

**UNIVERSIDADE FEERAL DO PARANÁ**

**LOYSE TUSSOLINI**

**SECAGEM DE FOLHAS E RAMOS DE ERVA-MATE EM LEITO DE CAMADA  
DELGADA: EXPERIMENTOS, MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE  
EM SECADOR DE ESTEIRA DE PASSAGEM SIMPLES E ZONA ÚNICA**

**CURITIBA**

**2014**

**LOYSE TUSSOLINI**

**SECAGEM DE FOLHAS E RAMOS DE ERVA-MATE EM LEITO DE CAMADA  
DELGADA: EXPERIMENTOS, MODELAGEM, SIMULAÇÃO E CONTROLE  
EM SECADOR DE ESTEIRA DE PASSAGEM SIMPLES E ZONA ÚNICA**

Tese apresentada como requisito parcial  
à obtenção do grau doutor. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de  
Alimentos – PPGEAL - Setor de  
Tecnologia, Universidade Federal do  
Paraná.

Orientador: Prof. Everton Fernando  
Zanoelo.

**CURITIBA**

**2014**

---

T965

Tussolini, Loyse

Secagem de folhas e ramos de erva-mate em leito de camada delgada: experimentos, modelagem, simulação e controle em secador de esteira de passagem simples e zona única / Loyse Tussolini. – Curitiba, 2014.  
93f. : il. color. ; 30 cm.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, 2014.

Orientador: Everton Fernando Zanoelo.  
Bibliografia: p. 83-93.

1. Erva-mate. 2. Erva-mate-Indústria. I. Universidade Federal do Paraná.  
II. Fernando Zanoelo, Everton. III. Título.

CDD: 663.96


---

**LOYSE TUSSOLINI**


**SECAGEM DE FOLHAS E RAMOS DE ERVA-MATE EM LEITO  
DE CAMADA DELGADA: EXPERIMENTOS, MODELAGEM,  
SIMULAÇÃO E CONTROLE EM SECADOR DE ESTEIRA DE  
PASSAGEM SIMPLES E ZONA ÚNICA**

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de  
Doutor no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Alimentos, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão  
formada pelos professores:

  
Orientador: Prof. Dr. ÉVERTON FERNANDO ZANOELO  
Setor de Tecnologia, UFPR

  
Prof. Dr. LUIZ AUGUSTO DA CRUZ MELEIRO  
Instituto de Tecnologia, UFRRJ

  
Prof. Dr. FERNANDO AUGUSTO PEDERSEN VOLL  
Setor de Tecnologia, UFPR

  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. AGNES DE PAULA SCHEER  
Setor de Tecnologia, UFPR

  
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. MARIA LUCIA MASSON  
Setor de Tecnologia, UFPR

Curitiba, 10 de julho de 2014.

## DEDICO ESTE TRABALHO

*A Deus,  
Aos meus queridos pais, Elson e Rose,  
A minha querida irmã Martha e ao João Hugo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por mais esta conquista que me concedeu.

Aos meus queridos pais, por serem o meu exemplo de vida.

A minha querida irmã e melhor amiga Martha, por todos os conselhos e apoio nos momentos de dificuldade. Ao meu cunhado João Hugo pela amizade.

A minha amada amiga Daniela de Araújo Sampaio, por estar sempre presente.

Aos meus amigos Laís Koop e Ronald Wbeimar Pacheco Ortiz, pelo companheirismo e amizade.

As minhas amigas e companheiras de casa, Flávia Daiana Montanici e Valesca Kotovicz, pelo acolhimento.

A CAPES pela concessão da bolsa de doutorado.

A todos que de alguma forma me ajudaram nesta conquista.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1. Esquema do aparato experimental .....	24
FIGURA 4.1. Curva de calibração da velocidade da esteira em função do sinal do potenciômetro (S). Símbolos: resultados experimentais; linha sólida: Equação (4.1).....	38
FIGURA 4.2. Perfil parabólico de temperatura do gás de secagem ao longo da direção axial do secador para o ensaio de secagem 1 da Tabela 3.1. Símbolos: resultados experimentais; linha sólida: $T_g = 53,3 + 50,2x - 59,5x^2$ .....	39
FIGURA 4.3. Perfil parabólico de temperatura ao longo da direção axial do secador para o ensaio de secagem 2 da Tabela 3.1. Símbolos: resultados experimentais; linha sólida: $T_g = 71,4 + 41,0x - 49,7x^2$ .....	40
FIGURA 4.4. Perfil parabólico de temperatura ao longo da direção axial do secador para o ensaio de secagem 3 da Tabela 3.1. Símbolos: resultados experimentais; linha sólida: $T_g = 71,8 + 81,7x - 92,3x^2$ .....	40
FIGURA 4.5. Perfil parabólico de temperatura ao longo da direção axial do secador para o ensaio de. secagem 4 da Tabela 3.1. Símbolos: resultados experimentais; linha sólida: $T_g = 75,5 + 169,6x - 186,7x^2$ .....	41
FIGURA 4.6. Perfil parabólico de temperatura ao longo da direção axial do secador para o ensaio de secagem 5 da Tabela 3.1. Símbolos: resultados experimentais; linha sólida: $T_g = 77,3 + 151,2x - 160,0x^2$ .....	41
FIGURA 4.7. Umidade experimental (símbolos) e calculada (linhas) de descarga da erva-mate em diferentes tempos de residência da esteira a $T_{gm}=55,6$ °C (perfil de $T_g$ na Figura 4.2). Condição de operação: ensaio 1 da Tabela 3.1. Linha tracejada: $C_s$ original; linha sólida: $C_s$ modificada.....	43
FIGURA 4.8. Umidade experimental (símbolos) e calculada (linhas) de descarga da erva-mate em diferentes tempos de residência da esteira a	

$T_{gm}=75,3$ °C (perfil de $T_g$ na Figura 4.3). Condição de operação: ensaio 2 da Tabela 3.1. Linha tracejada: $C_s$ original; linha sólida: $C_s$ modificada.....	44
FIGURA 4.9. Umidade experimental (símbolos) e calculada com $C_s$ (linhas) de descarga da erva-mate em diferentes tempos de residência da esteira a $T_{gm}=81,9$ °C (perfil de $T_g$ na Figura 4.4). Condição de operação: ensaio 3 da Tabela 3.1. Linha tracejada: $C_s$ original; linha sólida: $C_s$ modificada.....	44
FIGURA 4.10. Umidade experimental (símbolos) e calculada (linhas) de descarga da erva-mate em diferentes tempos de residência da esteira a $T_{gm}=98,1$ °C (perfil de $T_g$ na Figura 4.5). Condição de operação: ensaio 4 da Tabela 3.1. Linha tracejada: $C_s$ original (PANCHARIYA, POPOVIC e SHARMA, 2002); linha sólida: $C_s$ modificada (TUSSOLINI <i>et al.</i> , 2014). ....	45
FIGURA 4.11. Umidade experimental (símbolos) e calculada (linhas) de descarga da erva-mate em diferentes tempos de residência da esteira a $T_{gm}=99,6$ °C (perfil de $T_g$ na Figura 4.6). Condição de operação: ensaio 5 da Tabela 3.1. Linha tracejada: $C_s$ original (PANCHARIYA, POPOVIC e SHARMA, 2002); linha sólida: $C_s$ modificada (TUSSOLINI <i>et al.</i> , 2014). ....	45
FIGURA 4.12. Comparação entre curvas experimentais (símbolos) e calculada (linha sólida) de secagem de erva-mate em secador batelada a 72,9 °C. Condição de operação: ensaio 1 da Tabela 3.2. ....	46
FIGURA 4.13. Comparação entre curvas experimentais (símbolos) e calculada (linha sólida) de secagem de erva-mate em secador batelada a 86,6 °C. Condição de operação: ensaio 2 da Tabela 3.2. ....	47
FIGURA 4.14. Comparação entre curvas experimentais (símbolos) e calculada (linha sólida) de secagem de erva-mate em secador batelada a 92,5 °C. Condição de operação: ensaio 3 da Tabela 3.2. ....	47
FIGURA 4.15. Comparação entre curvas experimentais (símbolos) e calculada (linha sólida) de secagem de erva-mate em secador batelada a 109,7 °C. Condição de operação: ensaio 4 da Tabela 3.2. ....	48



FIGURA 4.16. Comparação entre curvas experimentais (símbolos) e calculada (linha sólida) de secagem de erva-mate em secador batelada a 133,0 °C. Condição de operação: ensaio 5 da Tabela 3.2. ....	48
FIGURA 4.17. Comparação entre curvas experimentais (símbolos) e calculada (linha sólida) de secagem de erva-mate em secador batelada a 132,4 °C. Condição de operação: ensaio 6 da Tabela 3.2. ....	49
FIGURA 4.18. Temperaturas medidas (símbolos) e calculadas (linha sólida) das folhas ao longo do secador de esteira a 69,9 °C. Condição de operação: ensaio 7 da Tabela 3.2. ....	50
FIGURA 4.19. Temperaturas medidas (símbolos) e calculadas (linha sólida) das folhas ao longo do secador de esteira a 79,1 °C. Condição de operação: ensaio 8 da Tabela 3.2. ....	51
FIGURA 4.20. Temperaturas medidas (símbolos) e calculadas (linha sólida) das folhas ao longo do secador de esteira a 83,9 °C. Condição de operação: ensaio 9 da Tabela 3.2. ....	51
FIGURA 4.21. Temperaturas medidas (símbolos) e calculadas (linha sólida) das folhas ao longo do secador de esteira a 98,9 °C. Condição de operação: ensaio 10 da Tabela 3.2. ....	52
FIGURA 4.22. Temperaturas medidas (símbolos) e calculadas (linha sólida) das folhas ao longo do secador de esteira a 114,3 °C. Condição de operação: ensaio 11 da Tabela 3.2. ....	52
FIGURA 4.23. Temperaturas medidas (símbolos) e calculadas (linha sólida) das folhas ao longo do secador de esteira a 118,6 °C. Condição de operação: ensaio 12 da Tabela 3.2. ....	53
FIGURA 4.24. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-point</i> de 1,43 para 1,0 (b.s.) (ver Figura 4.25). Condição de operação: ensaio 1 da Tabela 3.3. ....	55

FIGURA 4.25. Umidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-point</i> de 1,43 para 1,0 (b.s.). Condição de operação: idêntica à reportada na Figura 4.24. ....	55
FIGURA 4.26. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-point</i> de 1,14 para 0,7 (b.s.) (ver Figura 4.27). Condição de operação: ensaio 2 da Tabela 3.3. ....	56
FIGURA 4.27. Umidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-point</i> de 1,14 para 0,7 (b.s.). Condição de operação: idêntica à reportada na Figura 4.26. ....	56
FIGURA 4.28. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-point</i> de 1,42 para 0,9 (b.s.) (ver Figura 4.29). Condição de operação: ensaio 3 da Tabela 3.3. ....	57
FIGURA 4.29. Umidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-point</i> de 1,42 para 0,9 (b.s.). Condição de operação: idêntica à reportada na Figura 4.28. ....	57
FIGURA 4.30. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-point</i> de 0,9 para 0,6 (b.s.) (ver Figura 4.31). Condição de operação: ensaio 4 da Tabela 3.3. ....	58
FIGURA 4.31. Umidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-point</i> de 0,9 para 0,6 (b.s.). Condição de operação: idêntica à reportada na Figura 4.30. ....	58
FIGURA 4.32. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-</i>	

<i>point</i> de 1,71 para 0,9 (b.s.) (ver Figura 4.33). Condição de operação: ensaio 5 da Tabela 3.3. ....	59
FIGURA 4.33. Umidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-point</i> de 1,71 para 0,9 (b.s.). Condição de operação: idêntica à reportada na Figura 4.32. ....	59
FIGURA 4.34. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-point</i> de 1,09 para 0,6 (b.s.) (ver Figura 4.35). Condição de operação: ensaio 6 da Tabela 3.3. ....	60
FIGURA 4.35. Umidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-point</i> de 1,09 para 0,6 (b.s.). Condição de operação: idêntica à reportada na Figura 4.34. ....	60
FIGURA 4.36. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-point</i> de 1,21 para 0,6 (b.s.) (ver Figura 4.37). Condição de operação: ensaio 7 da Tabela 3.3. ....	61
FIGURA 4.37. Umidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-point</i> de 1,21 para 0,6 (b.s.). Condição de operação: idêntica à reportada na Figura 4.36. ....	61
FIGURA 4.38. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-point</i> de 0,48 para 0,2 (b.s.) (ver Figura 4.39). Condição de operação: ensaio 8 da Tabela 3.3. ....	62
FIGURA 4.39. Umidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no <i>set-point</i> de 0,48 para 0,2 (b.s.). Condição de operação: idêntica a reportada na Figura 4.38. ....	62

FIGURA 4.40. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a $3,5 \times 10^{-3}$ m durante a secagem a $T_{gm}=65,5$ °C. Condições de operação: ensaio 1 da Tabela 3.4. ....	63
FIGURA 4.41. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a $6,5 \times 10^{-3}$ m durante a secagem a $T_{gm}=65,5$ °C. Condições de operação: ensaio 2 da Tabela 3.4. ....	64
FIGURA 4.42. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a $10 \times 10^{-3}$ m durante a secagem a $T_{gm}=65,5$ °C. Condições de operação: ensaio 3 da Tabela 3.4. ....	64
FIGURA 4.43. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a $3,5 \times 10^{-3}$ m durante a secagem a $T_{gm}=80,2$ °C. Condições de operação: ensaio 4 da Tabela 3.4. ....	65
FIGURA 4.44. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a $6,5 \times 10^{-3}$ m durante a secagem a $T_{gm}=80,2$ °C. Condições de operação: ensaio 5 da Tabela 3.4. ....	65
FIGURA 4.45. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a $10 \times 10^{-3}$ m durante a secagem a $T_{gm}=80,2$ °C. Condições de operação: ensaio 6 da Tabela 3.4. ....	66
FIGURA 4.46. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a $3,5 \times 10^{-3}$ m durante a secagem a $T_{gm}=83,8$ °C. Condições de operação: ensaio 7 da Tabela 3.4. ....	66
FIGURA 4.47. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a $6,5 \times 10^{-3}$ m durante a secagem a $T_{gm}=83,8$ °C. Condições de operação: ensaio 8 da Tabela 3.4. ....	67
FIGURA 4.48. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a $10 \times 10^{-3}$ m durante a secagem a $T_{gm}=83,8$ °C. Condições de operação: ensaio 9 da Tabela 3.4. ....	67

FIGURA 4.49. Comparação entre valores calculados de temperatura dos ramos para $D=3,5\times 10^{-3}$ m (linha com traços curtos), $D=6,5\times 10^{-3}$ m (linha sólida) e $D=10\times 10^{-3}$ m (linha com traços longos) a $T_{gm}=80,2$ °C. ....	68
FIGURA 4.50. Comparação entre $Nu$ estimado com a Equação (4.3) (linha sólida) (proposta nesta investigação) e a Equação (3.12) (linha tracejada) da literatura (BENNETT e MYERS, 1978). Símbolos: valores de $Nu$ estimados com $h$ ajustados a partir da cinética experimental de aquecimento dos ramos. ....	70
Figura 4.51. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a $3,5\times 10^{-3}$ m a $T_{gm}=65,5$ °C. Condições de operação: ensaio 1 da Tabela 3.4. ....	72
Figura 4.52. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a $6,5\times 10^{-3}$ m a $T_{gm}=65,5$ °C. Condições de operação: ensaio 2 da Tabela 3.4. ....	72
Figura 4.53. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a $10\times 10^{-3}$ m a $T_{gm}=65,5$ °C. Condições de operação: ensaio 3 da Tabela 3.4. ....	73
Figura 4.54. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a $3,5\times 10^{-3}$ m a $T_{gm}=80,2$ °C. Condições de operação: ensaio 4 da Tabela 3.4. ....	73
Figura 4.55. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a $6,5\times 10^{-3}$ m a $T_{gm}=80,2$ °C. Condições de operação: ensaio 5 da Tabela 3.4. ....	74
Figura 4.56. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a $10\times 10^{-3}$ m a $T_{gm}=80,2$ °C. Condições de operação: ensaio 6 da Tabela 3.4. ....	74
Figura 4.57. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a $3,5\times 10^{-3}$ m a $T_{gm}=83,8$ °C. Condições de operação: ensaio 7 da Tabela 3.4. ....	75

Figura 4.58. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a $6,5 \times 10^{-3}$ m a $T_{gm}=83,8$ °C. Condições de operação: ensaio 8 da Tabela 3.4.....	75
Figura 4.59. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a $10 \times 10^{-3}$ m a $T_{gm}=83,8$ °C. Condições de operação: ensaio 9 da Tabela 3.4.....	76
Figura 4.60. Variação de eficiência térmica em função da fração mássica de folhas ( $x_f$ ) processada em um leito batelada com folhas e ramos em bandejas separadas.....	79

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1. Condições operacionais usualmente empregadas na desativação enzimática e secagem industrial de erva-mate. ....	8
TABELA 2.2. Parâmetros da Equação (2.6) para cálculo da condutividade térmica, densidade e viscosidade do ar. ....	16
TABELA 2.3. Modelos empíricos para secagem reportados na literatura. ....	17
TABELA 3.1. Condições de operação adotadas nos ensaios para calibração do modelo. $Ll=0$ e $LS=1,0$ .....	25
TABELA 3.2. Condições de operação empregadas nos ensaios para validação do modelo de secagem de folhas de erva-mate.....	26
TABELA 3.3. Condições de operação dos ensaios para validar estratégia de controle de umidade de folhas de erva-mate no secador de esteira investigado. $Kp=0,01 \text{ m s}^{-1}$ .....	27
TABELA 3.4. Condições de operação empregadas nos ensaios para validação do modelo de secagem e aquecimento de ramos de erva-mate no secador de esteira com $uc=0$ .....	29
TABELA 4.1. Eficiência térmica de secagem individual de folhas e ramos ( $D=10 \times 10^{-3} \text{ m}$ ) de erva-mate em secador de camada fina .....	78

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área de transferência de calor, $m^2$ ;
$a_i$	Parâmetros dos modelos de secagem da Tabela 2.3;
$b_i$	Parâmetros da Equação (2.6);
$Cp_g$	Calor específico do ar, $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ;
$Cp_l$	Calor específico da água líquida, $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ;
$Cp_p$	Calor específico dos ramos de erva-mate, $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ;
$Cp_{pm}$	Calor específico médio dos ramos de erva-mate, $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ;
$Cp_s$	Calor específico de folhas de erva-mate, $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ;
$Cp_{ss}$	Calor específico de folhas secas de erva-mate, $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ;
$Cp_v$	Calor específico do vapor d'água, $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ;
$C_s$	Coeficiente efetivo de transferência de massa para folhas de erva ou parâmetro da equação semi-empírica de Lewis, $s^{-1}$ ;
$D$	Diâmetro do ramo, m;
$D_a$	Difusividade de água no ramo, $m^2\ s^{-1}$ ;
$D_{ax}$	Difusividade de água no xilema, $m^2\ s^{-1}$ ;
$D_v$	Difusividade do vapor d'água no ar, $m^2\ s^{-1}$ ;
$ Fo$	Número de Fourier, adimensional;
$H$	Coeficiente de transferência de calor, $W\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$ ;
$h$	Coeficiente convectivo de transporte de calor para ramos, $J\ m^{-2}\ s^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ;
$h_{pm}$	Coeficiente convectivo modificado de transporte de calor para ramos, $s^{-1}$ ;
$h_m$	Coeficiente modificado de transferência de calor para folhas, $W\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ;
$J_0$	Função de Bessel de primeira espécie de ordem zero
$J_1$	Função de Bessel de primeira espécie de ordem um
$k_c$	Coeficiente convectivo de transporte de massa para ramos, $m\ s^{-1}$ ;
$k_g$	Condutividade térmica do ar de secagem; $J\ m^{-1}\ s^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ;
$k_p$	Condutividade térmica dos ramos de erva-mate, $J\ m^{-1}\ s^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ ;
$K_p$	Ganho proporcional, $m\ s^{-1}$ ;
$L$	Comprimento da esteira, m;
$LS$	Limite superior de integração da Equação (3.1), m;
$LI$	Limite inferior de integração da Equação (3.1), m;
$M$	Umidade de folhas de erva-mate em base seca, $kg\ kg^{-1}$ ;



$M_e$	Umidade de equilíbrio de folhas erva-mate em base seca, $\text{kg kg}^{-1}$ ;
$M_i$	Umidade de alimentação das folhas de erva-mate no secador de esteira, $\text{kg kg}^{-1}$ ;
$M_{in}$	Umidade inicial de folhas de erva-mate em base seca, $\text{kg kg}^{-1}$ ;
$M_o$	Umidade de folhas de erva mate na saída do secador de esteira (b.s.), $\text{kg kg}^{-1}$ ;
$M_p$	Umidade de ramos de erva-mate em base seca, $\text{kg kg}^{-1}$ ;
$M_{pe}$	Umidade de equilíbrio de ramos erva-mate em base seca, $\text{kg kg}^{-1}$ ;
$M_{pin}$	Umidade inicial de ramos de erva-mate em base seca, $\text{kg kg}^{-1}$ ;
$M_{sp}$	<i>Set-point</i> de umidade para folhas de erva-mate, $\text{kg kg}^{-1}$ ;
$Nu$	Número de Nusselt, adimensional;
$p$	Pressão atmosférica, Pa;
$Pr$	Número de Prandtl, adimensional;
$Q_g$	Vazão volumétrica de ar no secador a 21 °C, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ;
$R$	Raio do ramo, m;
$RH$	Umidade relativa, decimal;
$S$	Sinal do potenciômetro, %;
$Sc$	Número de Schmidt, adimensional;
$Sh$	Número de Sherwood, adimensional;
$T_g$	Temperatura do gás de secagem, °C;
$T_{gm}$	Temperatura média do gás de secagem (Equação 3.2), °C;
$T_p$	Temperatura dos ramos de erva-mate, °C;
$T_{pin}$	Temperatura inicial dos ramos de erva-mate, °C;
$T_s$	Temperatura das folhas de erva-mate, °C;
$T_{si}$	Temperatura de alimentação das folhas de erva-mate no secador de esteira, °C;
$T_{sin}$	Temperatura inicial das folhas de erva-mate, °C;
$t$	Tempo, s;
$u_g$	Velocidade do ar de secagem, $\text{m s}^{-1}$ ;
$u_c$	Velocidade da esteira, $\text{m s}^{-1}$ ;
$V$	Volume do ramo cilíndrico, $\text{m}^3$ ;
$x$	Posição ao longo do percurso da esteira, m;
$Y_0$	Função de Bessel de segunda espécie de ordem zero;

$Y_g$	Umidade absoluta do gás de secagem, kg kg <sup>-1</sup>
$\Delta H_v$	Calor latente de vaporização da água à pressão atmosférica, J kg <sup>-1</sup> ;
$\varepsilon(t)$	Diferença entre o <i>set-point</i> e dados virtuais de umidade, kg kg <sup>-1</sup> ;
$\gamma_n$	Raízes de $J_0$ ( $\gamma_n r/R$ )
$\lambda_n$	Raízes de $J_0$ ( $\lambda_n r$ )
$\mu_g$	Viscosidade do ar de secagem; kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
$\rho_g$	Densidade do ar de secagem, kg m <sup>-3</sup> ;
$\rho_p$	Densidade dos ramos de erva-mate, kg m <sup>-3</sup> ;
$\rho_{pm}$	Densidade média dos ramos de erva-mate, kg m <sup>-3</sup> ;
$\tau$	Tempo de residência no secador de esteira, s;
$\tau_d$	Tempo derivativo, s;
$\tau_i$	Tempo integral, s;
$\Omega$	Resistência difusiva, s m <sup>-3</sup> ;

## RESUMO

Resultados experimentais de umidade e temperatura de folhas e ramos de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) foram obtidos em secadores batelada e de esteira. A primeira resposta foi determinada por método gravimétrico convencional, enquanto que os valores da segunda foram gerados com um sensor de infravermelho para medidas de temperatura de superfícies. Folhas inteiras de espessura  $0,23 \times 10^{-4}$  m com formato aproximado de elipses (semi-eixos de 0,04 e 0,06 m), e ramos cilíndricos de  $4 \times 10^{-2}$  m de comprimento foram separadamente utilizados nos ensaios experimentais. Os experimentos foram conduzidos com o material disposto de modo a formar um leito de camada fina com área da base igual a 0,5-1 m de comprimento por 0,05 m de largura. O produto com umidades que variavam aproximadamente entre 0,5 a 1,7 em base seca foi submetido a secagem no intervalo de temperatura de 55 a 130 °C. No caso dos ramos, além do efeito da umidade inicial (e/ou de alimentação) e da temperatura, foi considerado a influência do diâmetro do sólido sobre a cinética de aquecimento e secagem em três níveis ( $3,5 \times 10^{-3}$  m,  $6,5 \times 10^{-3}$  m e  $10,0 \times 10^{-3}$  m). Valores experimentais das variáveis investigadas obtidos em malha aberta foram utilizados com o propósito de validação de dois diferentes modelos de secagem, para folhas e ramos, em secadores de camada fina. Ambos os modelos foram essencialmente obtidos por balanços de massa do soluto e energia, porém o equacionamento envolvendo os ramos como produto considera em detalhe os mecanismos de transporte de calor e massa. A diferença residual entre valores experimentais e calculados de umidade e temperatura dos sólidos em todas as condições investigadas confirma a confiabilidade dos modelos e permite a utilização dos mesmos para propósitos de otimização e controle. De fato, o modelo dinâmico para folhas foi empregado para ajuste dos parâmetros de um controlador PID empregado em uma estratégia de controle de umidade de descarga de folhas de erva-mate por manipulação da velocidade da esteira. Para esta particular finalidade, uma subrotina de otimização dos parâmetros do controlador (método simplex) foi implementada na rotina numérica de solução do sistema de equações diferenciais que caracteriza o modelo para folhas, a fim de gerar um conjunto

de valores da variável manipulada (velocidade da esteira) que permitisse o controle da umidade de descarga do sólido. A validade da estratégia de controle por realimentação foi verificada por comparação entre respostas experimentais e valores desejados de umidade em malha fechada através de perturbação do sistema (alteração do set-point) em diferentes condições de operação do secador de esteira.

**PALAVRAS-CHAVE:** Erva-mate; secador de esteira; controle de umidade; secagem; aquecimento; modelagem; simulação.

## ABSTRACT

Experimental results of moisture content and temperature of leaves and twigs of mate (*Ilex paraguariensis*) were obtained in a batch and in a conveyor dryer. The first response was determined by conventional gravimetric method, while the second was measured with an infrared sensor. Whole mate leaves of thickness  $0.23 \times 10^{-4}$  m, shaped like ellipses (semi-axes of 0.04 and 0.06 m), and cylindrical twigs  $4 \times 10^{-2}$  m in length were separately used in the experiments. Drying always taken place in a chamber fed with a thin bed of material 0.5-1 m long and 0.05 m wide. The product with an inlet/initial moisture content varied between 0.5 and 1.7 (d.b.) was dried in the temperature range from 55 to 130 °C. In the case of twigs, the influence the particle diameter ( $3.5 \times 10^{-3}$  m,  $6.5 \times 10^{-3}$  m and  $10 \times 10^{-3}$  m) on the kinetics of drying and heating was also considered. Open-loop experimental results of the investigated variables were used to validate two different drying models for leaves and twigs in thin layer dryers. Both the models are essentially based on a solute and energy balance, but the twigs equations consider the mechanisms of mass and heat transfer in detail. The residual difference between the experimental and calculated responses (i.e.; moisture content and solid temperature) under all the examined conditions confirms the reliability of the models. So, their use may be extended for the purpose of process optimization and control. In fact, the dynamic model for drying of leaves was applied to tune the parameters of a PID controller involved in a drying control strategy based on the manipulation of the speed of the conveyor. For this particular goal, a subroutine of optimization (simplex method) was implemented in a numerical computational program written to solve the ordinary system of differential equations that represents the drying model. In such a way, a set of manipulated variables (speed conveyor) that allows for the control of the moisture content in the discharge of the dryer was obtained. The consistency of the feedback control strategy was verified at quite different operating conditions by a comparison between measured and desired discharge moisture content of mate leaves by imposing step disturbances on the set-point.

**KEYWORDS:** Mate; conveyor dryer; moisture control; drying; heating; modeling; simulation.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	iv
LISTA DE TABELAS .....	xv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xvi
1. INTRODUÇÃO .....	3
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	6
2.1. Erva-Mate .....	6
2.2. Processamento de Erva-Mate.....	6
2.3. Secadores Rotativos e de Esteira .....	9
2.4. Controle de Umidade em Secadores .....	11
2.5. Sensores de Umidade.....	13
2.6. Propriedades Termofísicas do Ar de Secagem, Folhas e Ramos de Erva-Mate .....	14
2.7. Modelos Empíricos e Fenomenológicos de Secagem .....	16
2.8. Inovações no Processo de Secagem de Erva-Mate .....	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1. Materiais .....	22
3.2. Secador de Esteira de Bancada.....	22
3.3. Secagem e Aquecimento de Folhas de Erva-Mate .....	24
3.4. Secagem e Aquecimento de Ramos de Erva-Mate .....	28
3.5. Modelo Dinâmico para Secagem e Aquecimento de Folhas de Erva-Mate .....	29
3.6. Modelagem do Aquecimento e Secagem de Ramos de Erva-Mate.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	38
4.1. Folhas de Erva-Mate.....	38
4.3. Análise Térmica da Secagem de Folhas e Ramos .....	76
5. CONCLUSÕES .....	81

REFERÊNCIAS..... 83



## 1. INTRODUÇÃO

Embora a produção de erva-mate concentre-se essencialmente na Argentina e Brasil, os quais são os dois maiores produtores mundiais, o comércio de ramos e folhas de erva-mate desidratada ocorre em mais de 70 países em todos os continentes e movimenta cifras da ordem de US\$ 1 bilhão (RODRIGUESA, CARDOZO-FILHO e ZANOELO, 2010). Além disso, visto que a erva-mate é rica em uma variedade de compostos químicos de interesse comercial (cafeína, teobromina, ácidos clorogênicos, mais de 250 compostos voláteis, etc), a utilização do produto para produção de bebidas, cosméticos e fármacos é uma atividade de crescente relevância. No caso particular da indústria de alimentos brasileira, um exemplo clássico que revela a importância deste produto é a produção de bebidas não alcoólicas prontas para beber obtidas a partir de infusão de brotos de *Camellia sinensis* (planta utilizada para preparação dos chás verde e preto) e folhas/ramos de *Ilex paraguariensis* (erva-mate). Este segmento de bebidas registrou um incremento de consumo *per capita* de aproximadamente 7,7 % ao ano entre 2005 e 2010 (ABIR, 2011). As bebidas preparadas com extratos de erva-mate representaram uma parcela de 18 % deste mercado com um consumo da ordem de 13,9 e 17 milhões de litros em 2004 e 2008, respectivamente (ABIR, 2008).

Em um contexto industrial, independente do produto comercial de interesse a ser obtido a partir da erva-mate, as operações de desativação enzimática e secagem são tipicamente demandadas. A primeira operação visa reduzir a atividade das peroxidases e polifenoloxidasas presentes na erva-mate *in natura*, cujos efeitos principais são de formação de grupos cromóforos (isto é, escurecimento resultante da interação de compostos fenólicos entre si ou com proteínas) e produção de compostos com características sensoriais indesejáveis. Como a operação de desativação enzimática classicamente ocorre a altas temperaturas, a umidade do produto *in natura* é reduzida para aproximadamente  $0,33 \pm 0,11$  em base seca (ZANOELO, ABITANTE e MELEIRO, 2008). De qualquer forma, uma ulterior etapa de secagem em secador rotatório ou de esteira, onde as folhas e ramos são processados a

aproximadamente 60-130 °C é necessária para que a umidade atinja valores inferiores a 0,1 (b.s.) (BENINCÁ, 2009).

A etapa de secagem de erva-mate, como normalmente ocorre em outros processos industriais, é responsável por uma parcela considerável dos custos operacionais. Visto que o tempo de secagem aumenta drasticamente a medida que os valores desejados de umidade se aproximam da umidade de equilíbrio, produtos com umidades inferiores ao valor requerido tendem a envolver custos operacionais ainda maiores e desnecessários. Em contra-partida, a produção de folhas/ramos com umidades elevadas ou não-padronizadas ocasiona deterioração do produto por crescimento de microorganismos e alterações não controladas das características sensoriais do produto final, respectivamente. Umidades superiores às esperadas também incrementam os gastos com transporte de material e afetam de forma negativa o rendimento de operações adicionais importantes de beneficiamento das folhas desidratadas, como a extração com solvente.

O problema de custo e qualidade associados a etapa de secagem de erva-mate é agravado pela adoção, por parte das indústrias ervateiras, de uma estratégia de controle manual de umidade de descarga do produto, a qual classicamente apresenta sérias limitações (ORTEGA *et al.*, 2007; ZANOLO, ABITANTE e MELEIRO, 2008). Um aspecto adicional relevante que dificulta a padronização do produto e ocasiona perdas desnecessárias de energia é o fato de que a erva-mate processada em secadores industriais é constituída de ramos e folhas, que devido às suas distintas características geométricas e de estrutura interna apresentam taxas diferentes de secagem (HOLOWATY, RAMALLO e SCHIMALKO, 2012). Em outras palavras, pode-se dizer que uma determinada amostra de erva-mate com umidade média que atenda às especificações do produtor sempre apresentará umidade dos ramos maior que a desejada, enquanto que a umidade das folhas será por consequência inferior ao valor médio. O impacto desta secagem não uniforme sobre o custo e qualidade é naturalmente relevante (SCHMALKO, LOVERA e KOLOMIEJEC, 2011). De fato, uma técnica alternativa de secagem (secagem intermitente) tem sido proposta na literatura (SCHMALKO, LOVERA e KOLOMIEJEC, 2011; HOLOWATY, RAMALLO e SCHIMALKO, 2012) com o objetivo de permitir uma

secagem homogênea do material e de reduzir o consumo de energia do processo.

Neste contexto, o objetivo geral desta tese é investigar aspectos do processo de secagem de erva-mate que contribuam para a otimização dos custos e qualidade do produto final. Em particular, o trabalho é baseado na premissa de que a secagem de ramos e folhas em esteiras distintas e sobrepostas em secador de camada delgada seria a estratégia alternativa mais simples e econômica para reduzir custos de processamento e contornar a dificuldade associada a heterogeneidade do produto (folhas e ramos) em termos de forma, dimensões e estrutura interna. Sendo assim, o trabalho essencialmente é dividido em uma etapa experimental e de modelagem da secagem de folhas de erva-mate em secador batelada e de esteira, e outra análoga envolvendo somente os ramos. O modelo matemático obtido para representar a secagem de folhas foi empregado para verificar a validade de uma estratégia de controle de umidade de descarga das folhas por realimentação (controle *feedback*) em secador contínuo (de esteira) de camada fina. Nesta estratégia de controle sugeriu-se a utilização de um controlador PID e assumiu-se como variável manipulada a velocidade da esteira. A consistência do procedimento de controle foi testada por comparação entre resultados experimentais e desejados de umidade em malha fechada na saída do secador.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1. Erva-Mate

A erva-mate (*Ilex paraguariensis*) é uma espécie nativa das regiões subtropicais e temperadas da América do Sul, sendo um produto de origem florestal não madeirável, com cultivo denominado de silvicultura. Teve a sua origem na América do Sul e ocorre naturalmente na região noroeste da Argentina, sul do Brasil e leste do Paraguai (ROTTA e OLIVEIRA, 2005; BERTÉ, 2011). Em particular, a zona ervateira brasileira com produção agroindustrial concentra-se no Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, os quais são responsáveis por aproximadamente 97% da produção nacional (ABITANTE, 2007).

A área de cultivo brasileira de erva-mate é de cerca de 770 mil ha, envolvendo aproximadamente 180 mil propriedades rurais em 596 municípios (PARANÁ, 1993; VILCAHUAMAN, 1999; MACCARI JÚNIOR, 2005; ANDRADE, 1999). O beneficiamento ocorre em indústrias de pequeno e grande porte, gerando cerca de 710 mil empregos diretos (MACCARI JÚNIOR, 2005; EMBRAPA, 2005; JENSEN, 2011). O produto primário do processamento são folhas e ramos desidratados, os quais são comercializado em mais de 70 países (HALLOY e REID, 2003, CARDOZO JR *et al.*, 2007).

### 2.2. Processamento de Erva-Mate

O beneficiamento da erva-mate é um processo que compreende fundamentalmente as etapas de colheita, recepção, desativação enzimática, secagem, moagem, classificação granulométrica, mistura, armazenagem, embalagem e expedição (ESMELINDRO *et al.*, 2002; BASTOS *et al.*, 2006).

Do ponto de vista de qualidade e custo, as operações de desidratação enzimática e secagem são as de maior relevância (ZANOELO, ABITANTE e MELEIRO, 2008), logo serão as únicas detalhadas na sequência. A qualidade é

negativamente afetada pelo contato direto entre gases de combustão com a matéria-prima, visto que ambas as operações em questão demandam energia fornecida tipicamente pela combustão de lenha. Cabe ressaltar que o combustível utilizado nestes estágios pode atribuir a erva-mate diferentes características sensoriais que dificultam a padronização do produto final. Este inconveniente tem sido gradualmente eliminado, principalmente nos secadores, pela utilização de trocadores de calor, onde ar quente é aquecido e alimentado na câmara de secagem.

Um aspecto adicional de grande impacto negativo associado a qualidade é a falta de controle da umidade de descarga nos secadores (ZANOELO, ABITANTE e MELEIRO, 2008). A insuficiente remoção de umidade quase que sistematicamente observada em condições industriais de processamento de erva-mate (ZANOELO, ABITANTE e MELEIRO, 2008) permite a existência de uma atividade enzimática residual que por consequência evita a estabilização do produto durante a estocagem, o que pode resultar em uma excessiva concentração de compostos fenólicos oxidados, como taninos, espécies associadas com a cor marrom do produto e gosto amargo dos extratos de mate (CHEFTEL e CHEFTEL, 1992). O custo das operações de desativação enzimática e secagem é obviamente resultado das altas temperaturas empregadas nestes processos (ver Tabela 2.1 a seguir), da baixa eficiência térmica associada por exemplo a secagem (ZANOELO, DI CELSO e KASKANTZIS, 2007) e do descontrole da umidade de descarga (ZANOELO, ABITANTE e MELEIRO, 2008; TUSSOLINI *et al.*, 2014).

Os principais parâmetros de interesse nestas etapas são a temperatura, o tempo de residência das folhas no secador e a umidade de descarga. Por esta razão, os intervalos de temperatura, tempo de residência e umidade de descarga nestes dois estágios, em condições industriais de processamento de erva-mate são em geral reportados na literatura (NUÑEZ e KÄNZIG, 1995; SCHMALKO, MORAWICKI e RAMALLO, 1997; ESMELINDRO *et al.*, 2002; SCHMALKO, MACIEL e DELFEDERICO, 2003; SCHMALKO, SCIPIONI e FERREYRA, 2005; ZANOELO, 2005; ZANOELO, DI CELSO e KASKANTZIS, 2007; ABITANTE, 2007; ZANOELO, ABITANTE e MELEIRO, 2008). A Tabela

2.1 apresenta um panorama geral das condições operacionais típicas de desativação enzimática e secagem.

TABELA 2.1. Condições operacionais usualmente empregadas na desativação enzimática e secagem industrial de erva-mate.

Processo	$T_g$ (°C)	$\tau$ (s)	$M_o$ (b.s.)	Referência
Desativação Enzimática	400	480	-	Esmelindro <i>et al.</i> , 2002
	300-350	120	-	Schmalko <i>et al.</i> , 1997; Schmalko <i>et al.</i> , 2003
	400-460	-	-	Nuñez e Känzig, 1995
			0,33 ± 0,11	Zanoelo <i>et al.</i> , 2008
Secagem	60-130	14400	<10%	Nuñez e Känzig, 1995; Schmalko <i>et al.</i> , 2005; Abitante, 2007
	90-140	-	-	Zanoelo, 2005; Zanoelo <i>et al.</i> , 2007
	90-110	10800	-	Esmelindro <i>et al.</i> , 2002

A desativação enzimática é uma etapa que compreende a alimentação de erva-mate *in natura* na cavidade de um cilindro metálico com diâmetro próximo a 3 m e comprimento entre 15 e 20 m (ABITANTE, 2007). Devido a um movimento giratório com velocidades moderadas e ajuda de pás internas, as folhas são encaminhadas até o lado oposto. O material permanece no equipamento durante dois (SCHMALKO, MACIEL e DELFEDERICO, 2003) a oito minutos (ESMELINDRO *et al.*, 2002). Nesta etapa a temperatura da chama pode variar de 300-350 °C (SCHMALKO, MORAWICKI e RAMALLO, 1997) a 400-460 °C (NUÑEZ e KÄNZIG, 1995). A desativação enzimática ocorre em virtude das altas temperaturas encontradas neste equipamento. Neste estágio do processamento também ocorre uma pré-secagem do material de 60 ± 5% para valores em torno de 20 ± 15% em base úmida (ZANOELO *et al.*, 2003).

Após a desativação enzimática, o produto é alimentado em secadores que reduzem o teor de umidade das folhas a valores da ordem de 10% (ABITANTE, 2007). O tempo de residência da erva-mate no secador e a

temperatura do mesmo variam de acordo com as características operacionais do secador (ESMELINDRO *et al.*, 2002), mas em geral a secagem é realizada em temperaturas de aproximadamente 60 a 140°C por tempos não superiores a 4 horas (NUÑEZ e KÄNZIG, 1995; SCHMALKO, SCIPIONI e FERREYRA, 2005; ZANOELO, 2005; ZANOELO, PERALTA e ALZAMORA, 2007; ABITANTE, 2007). Dois tipos de secadores cujas configurações mecânicas serão descritas na próxima secção são classicamente empregados na etapa de secagem.

### 2.3. Secadores Rotativos e de Esteira

Os secadores rotativos consistem de um tambor cilíndrico giratório, horizontal ou levemente inclinado na direção da saída do material. O material úmido é alimentado em uma das extremidades do cilindro e recolhido com umidades inferiores na extremidade oposta. A medida que o cilindro gira a baixa velocidade, pás internas movem o material para o interior do cilindro (MCCABE, SMITH e HARRIOT, 1985). Secadores de erva-mate deste tipo são sempre aquecidos por contato direto de gases em um fluxo cocorrente ao de movimentação dos sólidos (ABITANTE, 2007). Entretanto, em diferentes aplicações não é incomum que os gases quentes passando por uma camisa externa de aquecimento, ou vapor d'água condensando em um conjunto de tubos internos montados na parede interna do tambor sejam responsáveis pelo calor fornecido (MCCABE, SMITH e HARRIOT, 1985). Detalhes deste último tipo de sistema de aquecimento são reportados por Foust *et al.* (1982).

Embora as condições de operação típicas em secadores rotativos de erva-mate tenham sido reportadas na Tabela 2.1 é pertinente que se saiba a ordem de grandeza destes mesmos parâmetros em secadores do mesmo tipo utilizados para outras finalidades. De acordo com a literatura, a velocidade mássica varia de 0,54 a 6,8 kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, enquanto que as temperaturas estão tipicamente entre 120 a 175 °C ou entre 540 a 815 °C para quando ar aquecido com vapor, ou gases quentes provenientes de fornalhas são respectivamente empregados no sistema de aquecimento (MCCABE, SMITH e HARRIOT,

1985). Os diâmetros dos tambores variam de 1 a 3 m e apresentam comprimentos que atingem em torno de 25 m (FOUST *et al.*, 1982; MCCABE, SMITH e HARRIOT, 1985). As velocidades de rotação são da ordem de 0,3 a 0,4 m s<sup>-1</sup> (MCCABE, SMITH e HARRIOT, 1985).

É interessante registrar que nos secadores rotativos utilizados na indústria ervateira, onde o produto em geral encontra-se em contato com gases de combustão, existe um gradiente longitudinal de temperatura importante. Na entrada a temperatura é da ordem de 350 °C (ver Tabela 2.1), enquanto que na saída a temperatura é reduzida para em torno de 110 °C (ESMELINDRO *et al.*, 2002).

Nos secadores de esteira, o material é transportado através de uma esteira de tela metálica introduzida em um túnel de secagem, e o gás de secagem pode ser soprado na forma contracorrente, cocorrente ou perpendicularmente (fluxo cruzado) ao sentido de deslocamento do material (FOUST *et al.*, 1982; MCCABE, SMITH e HARRIOT, 1985; ABITANTE, 2007). De modo geral, as espessura do leito variam de 0,013 a 0,15 m (FOUST *et al.*, 1982; MCCABE, SMITH e HARRIOT, 1985), mas na indústria ervateira os leitos são classicamente de camada espessa e apresentam alturas superiores a 0,5 m (ABITANTE, 2007), o que demanda tempos de secagem que variam de 14400 a 21600 s (ESMELINDRO *et al.*, 2002). As esteiras apresentam larguras que variam de aproximadamente 0,4 m a 2,7 m (FOUST *et al.*, 1982), mas tipicamente são de 2 m (MCCABE, SMITH e HARRIOT, 1985). O comprimento é por sua vez de 4 a 50 m (FOUST *et al.*, 1982; MCCABE, SMITH e HARRIOT, 1985), o que demanda tempos de residência de 300 a 7200 s (MCCABE, SMITH e HARRIOT, 1985).

Os secadores de esteira consistem em geral em várias câmaras interconectadas (zonas múltiplas) (VAN DELFT, 2010) de passagem múltipla do sólido (estágios múltiplos) (MCCABE, SMITH e HARRIOT, 1985; GILMOUR, 1987; TEMPLE e VAN BOXTEL, 2000; VAN DELFT, 2010). Neste contexto, um secador de zona única é aquele que apresenta uma única câmara de secagem, enquanto que um secador de passagem simples é aquele onde o ar utilizado para secagem passa pelo produto por uma única vez. Secadores multiestágios, ou de passagens múltiplas consistem em uma série de esteiras sobrepostas,



sendo que o material é alimentado no topo e descarregado na base. Em relação aos secadores monoestágio ou de passagem simples, os secadores de esteira multiestágios são mais empregados, visto que possuem uma maior eficiência térmica e requerem menor espaço. Secadores multiestágios, também denominados de "Tower Dryers" por McCabe *et al.* (1985), são frequentemente empregados na secagem comercial da *Camellia sinensis*, e envolvem 2 a 6 estágios (GILMOUR, 1987; TEMPLE e VAN BOXTEL, 2000). Segundo Gilmour (1987), neste tipo de configuração, o leito de brotos de *Camellia sinensis* apresenta alturas da ordem de 0,1 m e o tempo de residência no secador é de 900 a 1200 s. Os secadores de múltiplos estágios apresentam a vantagem adicional de permitir mistura das diferentes camadas de sólidos quando o secador é de camada espessa. Este fato é decorrente da cascata de sólidos promovida pela descarga do sólido da esteira superior para a inferior (VAN DELFT, 2010). O resultado desta mistura das camadas é uma secagem homogênea. Entretanto, o mesmo secador, principalmente quando envolve múltiplas zonas de secagem, dificulta sobremaneira o controle de umidade (VAN DELFT, 2010).

#### 2.4. Controle de Umidade em Secadores

Um processo industrial tem por finalidade a obtenção de grandes volumes de produto com qualidade e um custo mínimo de processamento. Em particular, a fim de alcançar um produto adequado às especificações legais, os fatores intrinsecamente dependentes do controle de umidade tem chamado a atenção das indústrias. No caso da erva-mate, devido as características do processo de manufatura detalhadamente apresentado na seção anterior, onde a secagem destaca-se, o controle de umidade é definitivamente decisivo para propósitos de redução de custo e padronização do produto.

Infelizmente o controle manual em operações de secagem apresenta sérias limitações (ORTEGA *et al.*, 2007). Neste sentido, a padronização de umidade em secadores industriais de erva-mate requer a aplicação de uma das inúmeras tecnologias de controle automático de secadores reportadas na

literatura (KIRANOUDIS, MAROULIS e MARINOS-KOURIS, 1994; FELLOWS, 2006; ORTEGA *et al.*, 2007; MUJUMDAR, 2006, JENSEN, 2011)

Os mais clássicos procedimentos de controle são o controle por realimentação (*feedback*) e o antecipatório (*feedforward*). No primeiro, tipicamente empregado em secadores, a variável manipulada é ajustada somente após o sistema sentir o efeito da perturbação efetuada, o que é permitido devido a leituras da variável controlada. Em contraste, no controle antecipatório a ação de controle é tomada antes do sistema sentir o efeito da perturbação. Este último tipo de estratégia de controle demanda medidas das perturbações *in-line* e um modelo de processo que seja capaz de descrever como a variável controlada responde as alterações nas perturbações e na variável manipulada. Ações de controle baseados na leitura da variável controlada não acontecem neste tipo de esquema de controle. O controle antecipatório é uma das primeiras técnicas indicadas quando o controle por retroação não apresenta um desempenho adequado. De fato, muitas malhas combinam controle por realimentação e o antecipatório, sendo que nestes casos o primeiro atua no sentido de corrigir eventuais imprecisões no modelo dinâmico, assim como para compensar falhas de controle gerados pela dificuldade de medidas de determinados distúrbios.

Embora de modo geral existam estratégias de controle mais sofisticadas do que o controle por realimentação e antecipatório (controle em cascata, controle por razão ou por relação, controle seletivo ou controle *override*, controle *split range*), recomendadas para situações específicas, esquemas avançados de controle que envolvem modelos de processo (IMC ou *Internal Model Control*, DMC ou *Dynamic Matrix Control*) são mais interessantes para os propósitos deste trabalho. Este fato decorre da disponibilidade de um modelo paramétrico para descrição do processo de secagem de materiais em secadores de esteira de camada fina (ZANOELO, ABITANTE e MELEIRO, 2008). De qualquer forma, como o potencial destas técnicas para os mesmos propósitos considerados nesta investigação serão explorados em trabalhos futuros, neste momento cabe somente o registro existência e possibilidade de aplicação das mesmas.

Visto que a estratégia de controle por realimentação (adotada nesta investigação) requer medidas *in-line* da variável manipulada, o que é em geral um aspecto que dificulta sua prática implantação, cabe descrever rapidamente um esquema de controle que contorna este problema. Trata-se do controle por inferência, o qual é utilizado quando a variável controlada não pode ser medida diretamente (MUJUMDAR, 2006). Nestes casos, o próprio modelo do processo ou modelos semi-empíricos podem ser empregados com o propósito de correlacionar variáveis de medida rápida e econômica (temperatura e umidade do gás, temperatura do sólido) com a umidade do sólido (JENSEN, MELEIRO e ZANOELO, 2011).

Um resumo de aplicações das diferentes técnicas de controle automático em secadores de diferentes tipos (fluidizados, batelada, de jorro, instantâneos) é reportado por Mujumdar (2006) e de forma ainda mais compacta por Jensen (2011). Nestas mesmas referências também são apresentadas as poucas investigações que exploraram o controle automático especificamente em secadores de esteira.

## 2.5. Sensores de Umidade

Num processo de secagem, tem-se a umidade como parâmetro notável na orientação e controle do processo. Associado a essa particularidade está o custo do processamento, bem como a qualidade final do produto. No entanto, controlar os processos de secagem se torna uma tarefa penosa, especialmente em virtude à complexidade de indicar a umidade dos sólidos de forma on-line. Já existem alguns dispositivos para a determinação da umidade, que são ajustados ao controle automático de secadores de esteira (MUJUMDAR, 2006; WANG *et al.*, 2009; JENSEN, 2011).

São muitas as técnicas para a determinação de umidade de sólidos disponíveis (ressonância de micro-ondas, capacitância, condutividade e resistência elétrica, espectroscopia de infravermelho próximo – NIR e microondas), porém não são aplicáveis no controle de umidade em secadores, já que não são capazes de conceder em tempo real valores de umidade dos sólidos (ABITANTE, 2007; BUSCHMÜLLER *et al.*, 2008; WANG *et al.*, 2009;

MIZUKAMI, SAWAY e YAMAGUCHI, 2006; GAWANDE *et al.*, 2003; LIU *et al.*, 2008; RANTANEM *et al.*, 1998; MANTANUS *et al.*, 2009; TEMPLE, 2000; HALL, ROBERTSON e SCOTTER, 1988; KING *et al.*, 1992; JENSEN, 2011).

No emprego em controle dinâmico, técnicas para determinação de umidade que compreendem medidas de propriedades elétricas (impedância e capacitância) e espectroscopia por reflexão no infravermelho próximo (NIRS) demonstraram-se viáveis (HALL, ROBERTSON e SCOTTER, 1988; TEMPLE, 2000; RYWOTYCKI, 2003; MIZUKAMI, SAWAI e YAMAGUSHI, 2006, JENSEN, 2011).

Mizukami, Sawai e Yamagushi (2006) avaliaram o método que engloba a mensuração das propriedades elétricas de amostras e sua analogia com a umidade do sólido, a fim de definir a capacitância e impedância de amostras de *Camellia sinensis* com umidades distintas. Foi possível considerar uma coerência entre a umidade e as propriedades elétricas, que concedem a definição da umidade com um erro padrão de estimativa baixo (aproximadamente 3,6% em base seca). Mesmo que o método precise de um contato entre amostra e o sensor, as vantagens de fornecer uma resposta rápida e ter um erro relativamente baixo, o uso desse tipo de sensor para determinar a umidade de erva-mate em secadores de esteira, torna-se atraente.

## 2.6. Propriedades Termofísicas do Ar de Secagem, Folhas e Ramos de Erva-Mate

Os modelos matemáticos para descrição da secagem, quando utilizados para simulação, demandam em geral de propriedades termofísicas. Neste sentido, algumas dessas propriedades de erva-mate que são especificamente requeridas para solução dos modelos de secagem e aquecimento são reportadas na sequência.

A umidade de equilíbrio se refere ao valor de umidade de um sólido em equilíbrio com o ar ambiente à determinada condição de umidade relativa e temperatura (ABITANTE, 2007). No presente trabalho, utilizou-se a expressão

empírica de Halsey Modificada (Equação 2.1) para determinação da umidade de equilíbrio de folhas de erva-mate (ZANOELO, 2005). O modelo é capaz de explicar 96% das variações dos teores de umidade de equilíbrio frente a variação da umidade relativa no intervalo de 11 a 75 % nas temperaturas entre 30 e 50 °C (ZANOELO, 2005).

$$M_e = 10^{-2} \left[ \frac{-\exp(5,7 \times 10^{-3} T_g) + 3,02}{\ln(RH)} \right]^{0,662} \quad (2.1)$$

Equações para o cálculo do calor específico de erva-mate em função da umidade são reportadas na literatura (SCHMALKO, MORAWICKI e RAMALLO, 1997; SCHMALKO, PERALTA e ALZAMORA, 2007; ZANOELO, BENINCÁ e RIBEIRO, 2011). Em particular, as Equações (2.2) (SCHMALKO, MORAWICKI e RAMALLO, 1997; SCHMALKO, PERALTA e ALZAMORA, 2007) e (2.3) (ZANOELO, BENINCÁ e RIBEIRO, 2011) são para folhas, enquanto que a Equação (2.4) é para ramos (SCHMALKO, PERALTA e ALZAMORA, 2007). De qualquer forma, no caso de folhas, cabe destacar que somente o calor específico do produto seco é necessário, o qual foi obtido assumindo-se  $M$  igual a zero na Equação (2.3), a qual é a expressão mais recente proposta na literatura.

$$Cp_s = 1539 + 2720 \left( \frac{M}{M + 1} \right) \quad (2.2)$$

$$Cp_s = \frac{1780 + Cp_l M}{M + 1} \quad (2.3)$$

$$Cp_p = 1790 + 2360 \left( \frac{M_p}{M_p + 1} \right) \quad (2.4)$$

A densidade dos ramos de erva-mate pode ser estimada pela Equação (2.5) (SCHMALKO, PERALTA e ALZAMORA, 2007).

$$\rho_p = 701 + 730M_p \quad (2.5)$$

As propriedades térmicas do ar demandadas nesta investigação foram estimadas pela correlação empírica apresentada a seguir (Equação 2.6) com coeficientes reportados na Tabela 2.2. A equação foi proposta por ajuste de parâmetros envolvendo dados experimentais das propriedades reportadas na literatura na faixa de  $T_g$  entre aproximadamente 20 °C e 180 °C (HOLMAN, 1983).

$$k_g, \rho_g, \mu_g = b_1 + b_2 T_g + b_3 (T_g)^2 \quad (2.6)$$

TABELA 2.2. Parâmetros da Equação (2.6) para cálculo da condutividade térmica, densidade e viscosidade do ar.

Propriedade	$b_1$	$b_2$	$b_3$
$k_g$	$2,416 \times 10^{-2}$	$7,402 \times 10^{-5}$	
$\mu_g$	$1,935 \times 10^{-5}$	$1,269 \times 10^{-8}$	$1,06 \times 10^{-10}$
$\rho_g$	1,298	$-4,584 \times 10^{-3}$	$9,606 \times 10^{-6}$
$Cp_g$	1005,6	$7,31 \times 10^{-3}$	$4,32 \times 10^{-4}$

## 2.7. Modelos Empíricos e Fenomenológicos de Secagem

A descrição da cinética de secagem através de modelos matemáticos é essencial para o projeto, otimização e controle do processo de secagem (ZHU e SHEN, 2014). Na literatura são disponíveis inúmeros estudos de processos industriais de secagem amparados por modelos matemáticos (BRASIELLO *et al.* 2013, KARIM e HAWLADER, 2005). No entanto, apesar da variedade de modelos envolvidos nestas investigações, os mesmos podem ser classificados essencialmente em dois grandes grupos: *i*) modelos empíricos; e *ii*) modelos teóricos ou fenomenológicos (BRASIELLO *et al.* 2013). Modelos semi-empíricos, de modo geral, não constituem uma classe distinta das anteriormente citadas. Estes modelos tem uma base fenomenológica, mas

envolvem parâmetros de transporte que são determinados empiricamente. Devido a esta peculiar característica, são frequentemente classificados como modelos empíricos ou fenomenológicos, ou eventualmente como semi-empíricos.

Modelos empíricos de secagem são em geral expressões simplificadas, onde os parâmetros representam combinações de coeficientes de transporte de calor e massa por difusão e convecção. Neste tipo de equacionamento, não é de interesse explorar os mecanismos de transporte envolvidos no processo de secagem. Uma característica adicional destes modelos é que a variação de umidade é tratada como se fosse independente da cinética de aquecimento do sólido. Sendo assim, o modelo é constituído fundamentalmente por uma única equação, como pode ser observado na Tabela 2.3 (ZANOELO *et al.*, 2007; BARBOSA *et al.*, 2007; HILL *et al.*, 2008; TAHERI-GARAVANDA *et al.*, 2011).

Modelos empíricos com esta característica são especialmente recomendados para descrever a secagem em leito de camada fina, porém podem ser aplicados para descrever secagem em leito de camada espessa desde que as variações das propriedades do gás, oriundas de balanços material e de energia na fase fluida do secador, sejam consideradas (SILVA *et al.*, 2014; KOOP, 2014).

TABELA 2.3. Modelos empíricos para secagem reportados na literatura.

Nome	Modelo
Newton ou Lewis	$\frac{M - M_e}{M_{in} - M_e} = \exp(-C_s t)$
Henderson e Pabis	$\frac{M - M_e}{M_{in} - M_e} = a_1 \exp(-a_2 t)$
Page	$\frac{M - M_e}{M_{in} - M_e} = \exp(-a_3 t^{a_4})$
Exponencial com Dois Termos	$\frac{M - M_e}{M_{in} - M_e} = a_5 \exp(-a_6 t) + a_7 \exp(-a_8 t)$

Vários modelos empíricos adicionais aos mais comuns já reportados na Tabela 2.3 podem ser encontrados na literatura. Dentre estes destacam-se os modelos Logarítmico, de Henderson e Pabis Modificado, de Wang e Singh, de Thompson, de Método Difusivo (Approach Diffusion), entre outros (ZANOELO *et al.*, 2007; BARBOSA *et al.*, 2007; HII *et al.*, 2008; TAHERI-GARAVANDA *et al.*, 2011). Exceto pelo modelo de Page, o qual é extensivamente aplicado, as demais equações na Tabela 2.3 foram apresentadas por que são baseadas em simplificações da solução analítica da 2ª lei de Fick (ZANOELO *et al.*, 2007).

Modelos teóricos são geralmente baseados em balanços de massa e energia nas fases fluida e sólida do secador. Modelos deste tipo são empregados para descrever processos contínuos em leitos de camada fina (KIRANOUDIS *et al.*, 1995; ZANOELO *et al.*, 2008; JENSEN, MELEIRO e ZANOELO, 2011), leitos estacionários de camada espessa (SHARP, 1982; CALÇADA, BISCAIA JR e MASSARANI, 1993; MANDAS e HABTE, 2002; SRIVASTAVA e JOHN, 2002; ZARE e CHEN, 2009; ZARE, JAYAS e SINGH, 2012; MARTINELLO, MUÑOZ e GINER, 2013), ou secagem em secadores contínuos de camada espessa (SCHMALKO, PERALTA e ALZAMORA, 2007; VAN DELFT, 2010; KOOP, 2014). Cabe ressaltar que o caráter fenomenológico do modelo é mais característico se os balanços envolvidos são baseados na premissa de que o mecanismo de transporte é governado pela difusão/condução, convecção ou combinação de ambos. Por exemplo, se a difusão governa o transporte de massa, um balanço material para o soluto com condições de contorno que negligenciam a convecção, gerará um modelo fenomenológico que é representado pela 2ª Lei de Fick de Difusão. Este tipo de modelo é corriqueiramente explorado para descrever a cinética de secagem de sólidos preferencialmente grandes, como avelã, batata e tomate (BRASIELLO *et al.* 2013; ZHU e SHEN, 2014), onde a difusão torna-se o fenômeno controlador. A solução destes modelos é em geral bem mais complexa que a solução dos modelos empíricos, pois envolvem sistemas de equações diferenciais ordinárias ou parciais.

Em resumo, apesar dos inconvenientes computacionais dos modelos teóricos, os mesmos fornecem informações úteis sobre os mecanismos físicos envolvidos no processo de secagem e são mais consistentes em relação a



predição da cinética em um intervalo mais amplo de condições operacionais. Em contraste, os modelos empíricos, derivados de expansões em série de soluções gerais dos modelos teóricos ou de equações cinéticas de caráter completamente empírico, são de aplicação imediata devido a baixa complexidade envolvida na solução. Entretanto, são de utilização restrita às condições de operação adotadas nos procedimentos de ajuste dos parâmetros do modelo. Estes modelos simplificados não fornecem qualquer tipo de informação sobre os mecanismos de transporte de calor e massa.

## 2.8. Inovações no Processo de Secagem de Erva-Mate

Uma leitura crítica da seção 2.2 (Processamento de Erva-Mate) evidencia que de modo geral as operações relevantes na indústria de beneficiamento de erva-mate, do ponto de vista energético e de qualidade do produto final (desativação enzimática e secagem), não tem sofrido transformações significativas. Essencialmente as três maiores evoluções, as quais foram de fato implementadas em um número limitado de indústrias, resumem-se: *i*) a adoção de trocadores de calor nos secadores (queimadores indiretos), o que permite a substituição dos gases de combustão de lenha, como meio de secagem, por ar quente; *ii*) a utilização de secadores de esteira com controle manual de velocidade da esteira; *iii*) o emprego de secadores de esteira multi-estágios (de passagem múltipla). A primeira inovação provavelmente surgiu da necessidade de reduzir os inúmeros incêndios na indústria de mate, sistematicamente produzidos pelo contato direto entre fagulhas, presentes nos gases de combustão de lenha, e a erva-mate a ser desidratada. Esta solução, adotada desde longa data na indústria de beneficiamento de *Camellia sinensis* (GILMOUR, 1987), tem efeito positivo sobre a qualidade do produto, mas reduz a eficiência térmica. De fato, esta última desvantagem dos trocadores fez com que a utilização de um sistema direto de aquecimento com gases de combustão fosse repensado na indústria de chá, o que gerou inovações que resolveram os típicos problemas de cinzas, fumaça e fagulhas presentes no gás de secagem (GILMOUR, 1987). A

segunda das inovações citadas teoricamente deveria apresentar um grande impacto positivo, pois a erva-mate é sujeita a condições não controláveis de campo e colheita que alteram a umidade de alimentação nos secadores. Neste sentido, o controle manual da velocidade da esteira, ainda que não seja uma estratégia de controle ideal, contribui para uniformização do produto final em termos de umidade. As vantagens da utilização de secadores de esteira de passagem múltiplas foram reportadas resumidamente na seção 2.3 (Secadores Rotativos e de Esteira).

Embora as modificações implementadas nas etapas industriais de secagem de erva-mate sejam modestas e restritas a um número reduzido de empresas, a causa maior deste problema certamente não é a indisponibilidade de tecnologias alternativas. De fato, inúmeros trabalhos tem sido reportados na literatura propondo importantes inovações para as etapas de desativação enzimática (ZANOELO, CARDOZO-FILHO e CARDOZO JÚNIOR, 2006), mas principalmente de secagem de erva-mate e *Camellia sinensis* (GILMOUR, 1987; TEMPLE e VAN BOXTEL, 1999a; TEMPLE e VAN BOXTEL, 2000; TEMPLE, VAN BOXTEL e VAN STRANTEN, 2000; ZANOELO, CARDOZO-FILHO e CARDOZO JÚNIOR, 2006; ZANOELO, DI CELSO e KASKANTZIS., 2007; ZANOELO, 2007; ZANOELO, ABITANTE e MELEIRO, 2008; JENSEN, MELEIRO e ZANOELO 2011; SCHMALKO, LOVERA e KOLOMIEJEC, 2011; HOLOWATY, RAMALLO e SCHIMALKO, 2012).

O objetivo desta seção não é apresentar em detalhe uma revisão das inovações possíveis de serem implementadas nas etapas de secagem de erva-mate, mas citar as opções a serem consideradas com base em evidências da literatura. De modo geral, os trabalhos consideram, a secagem com vapor superaquecido (ZANOELO, CARDOZO-FILHO e CARDOZO JÚNIOR, 2006), a secagem em leito fluidizado (GILMOUR, 1987; ZANOELO, 2007; TEMPLE e VAN BOXTEL, 1999a), a otimização do processo de secagem por variação das condições de operação ou reaproveitamento de calor (GILMOUR, 1987; ZANOELO, DI CELSO e KASKANTZIS., 2007; ZANOELO, 2007), a secagem em camada fina (ZANOELO, ABITANTE e MELEIRO, 2008; JENSEN *et al.*, 2011), o controle automático de umidade em secadores contínuos (ZANOELO, ABITANTE e MELEIRO, 2008; JENSEN, MELEIRO e ZANOELO, 2011;

TEMPLE *et al.*, 2000), e a secagem intermitente (SCHMALKO, LOVERA e KOLOMIEJEC, 2011; HOLOWATY, RAMALLO e SCHMALKO., 2012).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta essencialmente os procedimentos envolvidos nos ensaios experimentais de secagem de folhas (secção 3.3) e ramos (secção 3.4), e no equacionamento matemático para descrição do processo de secagem e aquecimento de folhas (secção 3.5) e ramos (secção 3.6).

#### 3.1. Materiais

Todos os experimentos com folhas envolveram folhas inteiras com formato aproximado de elipses quando projetadas em um plano bidimensional. O semi-eixo maior era de aproximadamente 0,06 m e o menor não superior a 0,04 m. A espessura das folhas inteiras era próxima àquela de folhas desidratadas (i.e.;  $0,23 \times 10^{-4}$  m), determinada com um paquímetro digital por Jensen e Zanoelo (2013). As folhas *in natura* utilizadas nos ensaios apresentavam umidade entre aproximadamente 0,5 a 1,7 em base seca.

Os ramos de erva-mate com casca apresentavam formato cilíndrico com aproximadamente  $4 \times 10^{-2}$  m de comprimento e três diferentes diâmetros:  $3,5 \times 10^{-3} \pm 0,5 \times 10^{-3}$  m;  $6,5 \times 10^{-3} \pm 0,7 \times 10^{-3}$  m e  $10 \times 10^{-3} \pm 1,0 \times 10^{-3}$  m. Da mesma forma que as folhas, ramos *in natura* foram empregados nos experimentos, porém a umidade dos mesmos era da ordem de 0,71-0,89.

#### 3.2. Secador de Esteira de Bancada

O secador de esteira de bancada utilizado consistia em uma câmara de secagem com largura interna de 0,05 m, comprimento de 1 m e altura igual a 0,5 m. As paredes da câmara foram construídas com chapas duplas de aço galvanizado preenchidas com painéis de lã de vidro de 0,020 m de espessura e com revestimento externo aluminizado. No interior da câmara foi inserida uma esteira de teflon perfurada, movimentada por um rolo de tração conectado a um sistema motriz. Os furos na esteira apresentavam diâmetro igual a 0,003 m e

dispunham-se em arranjo retangular com menor e maior espaçamento entre furos aproximadamente iguais a 0,005 e 0,01 m, respectivamente.

Os rolos guia e de tração, os quais encontravam-se em extremidades opostas e externas a câmara de secagem, foram construídos em polipropileno e revestidos com fita adesiva antiderrapante. Ambos os rolos apresentavam pequenas abas laterais a fim de evitar o escorregamento lateral da esteira. O sistema de movimentação do rolo de tração envolvia um redutor mecânico de velocidade de 80:1 (STM, UMI 30) conectado a um motor de 12 v, e 50 W de potência nominal (WAPSA Ind. Brasileira) acoplado a um potenciômetro (6-50 v, 350 W de máxima potência) com indicador de mínima e máxima corrente (S, 0 a 100 %).

Um compressor de 746 W (1 hp) com deslocamento teórico de 170 litros por minuto (Schulz Compressores, MSV 6/30) foi utilizado para insuflar ar a pressão atmosférica para dentro da câmara em duas diferentes posições na base do secador ( $x=0,25$  e  $x=0,75$  m). Com o intuito de promover uma distribuição uniforme do gás de secagem o mesmo foi forçado a passar através de uma bandeja perfurada contendo partículas de cerâmica. A velocidade do ar na câmara de secagem foi estimada como a razão entre a vazão volumétrica de ar ( $Q_g=3,4\times10^{-3} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) e a área da base do secador ( $A_b=0,05 \text{ m}^2$ ) (Equação 3.1).

$$u_g = \left( \frac{Q_g}{A_b} \right) \left( \frac{T_g + 273,15}{21 + 273,15} \right) \quad (3.1)$$

Um forno tubular (220 v e 2800 W) com controle manual de temperatura (Gerb. Kles. Düsseldorf, Fabrik für Laboratoriums) foi utilizado para aquecimento do ar proveniente do compressor. A temperatura do ar dentro da câmara de secagem foi monitorada através de quatro termopares do tipo *K* previamente calibrados, os quais encontravam-se a 0,1 m, 0,25 m, 0,75 m e 0,90 m da entrada do secador. Uma representação esquemática do aparato experimental utilizado nos ensaios de secagem e controle de umidade é observada na Figura 3.1.

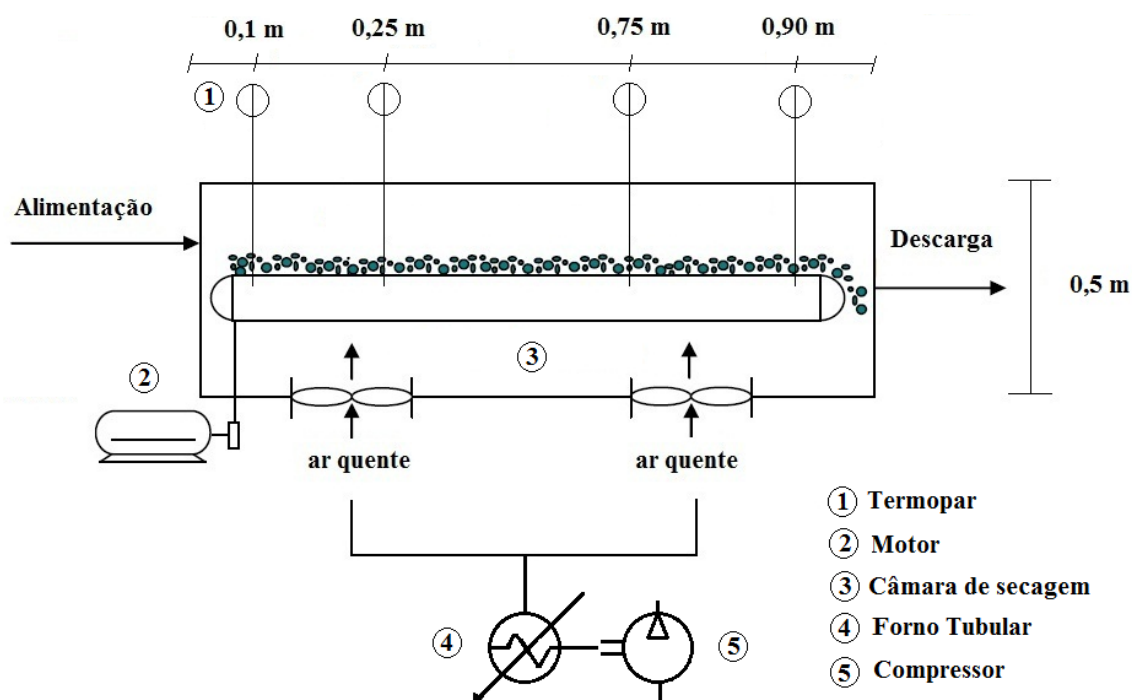


FIGURA 3.1. Esquema do aparato experimental

A fim de converter os sinais do potenciômetro ( $S$  em %) em velocidade da esteira ( $u_c$  em  $\text{m s}^{-1}$ ) foi construída uma curva de calibração. Para tal, simplesmente determinou-se com auxílio de um cronômetro digital (Cronobio, SW2018) os tempos transcorridos para que houvesse um deslocamento da esteira de 1 m para valores de  $S$  de 30 a 100 % com passo  $\Delta S=10$  %.

### 3.3. Secagem e Aquecimento de Folhas de Erva-Mate

Curvas de umidade na descarga em função do tempo de residência foram construídas através de ensaios com leitos de folhas de altura não superior a 0,05 m, que foram alimentados em uma das extremidades da esteira movimentada em diferentes velocidades ( $S$ : 30 %, 40%, 50 %, 60%, 70%, 80 %, 90 % e 100 %). As folhas submetidas a secagem, recolhidas manualmente na descarga do secador, foram conduzidas a ensaios de determinação de umidade por método gravimétrico convencional (INTERNATIONAL

STANDARDS ORGANIZATION, 1980) com balança de quatro dígitos (Bioprecisa, FA2104) e estufa com controle PID de temperatura (SOLAB, SL100/100). As condições de operação adotadas nestes ensaios, os quais foram essencialmente realizados para calibração do modelo, são reportadas na Tabela 3.1, onde a velocidade da esteira ( $u_c=L/\tau$ ) estava na faixa de  $3,7\times 10^{-4}$  -  $1,5\times 10^{-3}$  m.s<sup>-1</sup>. Nesta e nas demais tabelas deste documento, a temperatura média na câmara de secagem foi estimada pela Equação (3.2).

TABELA 3.1. Condições de operação adotadas nos ensaios para calibração do modelo.  $L=0$  e  $LS=1,0$

Ensaio	$T_{si}$ (°C)	$Y_g$ (kg kg <sup>-1</sup> )	$T_g$ (°C)	$T_{gm}$ (°C)
1	25	0,013	$53,3 + 50,2x - 59,5x^2$	55,6
2	25	0,013	$71,4 + 41,0x - 49,7x^2$	75,3
3	27	0,015	$71,8 + 81,7x - 92,3x^2$	81,9
4	27	0,015	$75,5 + 169,6x - 186,7x^2$	98,1
5	25	0,013	$77,3 + 151,2x - 160,0x^2$	99,6

$$T_{gm} = \frac{1}{(LS - LI)} \int_{LI}^{LS} T_g dx \quad (3.2)$$

Em um segundo momento, resultados experimentais de umidade de erva-mate em função do tempo foram inicialmente obtidos com a esteira desligada. Neste caso em particular, um leito de folhas análogo ao dos ensaios reportados na Tabela 3.1, foi alimentado entre as posições 0,25 e 0,75 m da entrada. Amostras de folhas (4 folhas inteiras) foram removidas do leito em intervalos regulares de 600 s e posteriormente utilizadas para a determinação de umidade por gravimetria (INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION, 1980). A Tabela 3.2 (ensaios 1 a 6) apresenta as condições de operação empregadas nestes experimentos.

Dados de temperatura das folhas em função do tempo também foram registrados alimentando-se folhas em uma das extremidades da esteira. Entretanto, as temperaturas foram medidas com sensor de infravermelho (Scan

Temp 410, TFA Dostmann) em intervalos irregulares, mas com a esteira deslocando-se unicamente em sua velocidade mínima ( $S=30\%$ ). Nas três distintas condições examinadas os ensaios foram repetidos em diferentes temperaturas do ar de secagem no intervalo de aproximadamente 56 a 120 °C. Em todos os casos folhas *in natura* a temperatura ambiente foram alimentadas no secador. As condições experimentais adotadas nestes ensaios de aquecimento e secagem das folhas são reportadas nos ensaios 7 a 12 da Tabela 3.2.

TABELA 3.2. Condições de operação empregadas nos ensaios para validação do modelo de secagem de folhas de erva-mate.

Ensaio	$u_c$ (m s <sup>-1</sup> )	$T_{sr}=T_{sin}$ (°C)	$Y_g$ (kg kg <sup>-1</sup> )	$T_g$ (°C)	$T_{gm}$ (°C)	$LI$ (m)	$LS$ (m)
1	0	34,9	0,013	$64,3 + 43,4x - 48,2x^2$	72,9	0,25	0,75
2	0	25	0,013	$59,3 + 119,9x - 120,5x^2$	86,6	0,25	0,75
3	0	31,2	0,015	$58,2 + 143,7x - 138,5x^2$	92,5	0,25	0,75
4	0	31,1	0,017	$66,7 + 179,9x - 173,3x^2$	109,7	0,25	0,75
5	0	35,3	0,024	$52,3 + 324,6x - 301,0x^2$	133,0	0,25	0,75
6	0	30,6	0,021	$74,4 + 235,4x - 220,5x^2$	132,4	0,25	0,75
7	$3,7 \times 10^{-4}$	34,9	0,013	$64,3 + 43,4x - 48,2x^2$	69,9	0	1
8	$3,7 \times 10^{-4}$	25	0,013	$59,3 + 119,9x - 120,5x^2$	79,1	0	1
9	$3,7 \times 10^{-4}$	31,2	0,015	$58,2 + 143,7x - 138,5x^2$	83,9	0	1
10	$3,7 \times 10^{-4}$	31,1	0,017	$66,7 + 179,9x - 173,3x^2$	98,9	0	1
11	$3,7 \times 10^{-4}$	35,3	0,024	$52,3 + 324,6x - 301,0x^2$	114,3	0	1
12	$3,7 \times 10^{-4}$	30,6	0,021	$74,4 + 235,4x - 220,5x^2$	118,6	0	1

Visto que um dos objetivos principais desta investigação é a validação de uma estratégia de controle por realimentação, ensaios de secagem foram conduzidos com este propósito. Em particular, folhas com umidade previamente conhecida arranjadas de modo a formar um leito de altura  $\leq 0,05$  m foram alimentadas no secador com a esteira em movimento. A velocidade da esteira foi modificada manualmente em intervalos de 120 s de acordo com recomendações resultantes de simulações com um secador virtual operando



em malha fechada nas mesmas condições dos experimentos. Os secadores real e virtual foram submetidos a uma idêntica perturbação no set-point, de modo que a velocidade deveria ser manipulada para que a umidade inicial fosse reduzida a um determinado valor desejado. Os ensaios foram conduzidos em diferentes temperaturas do ar de secagem sempre com diferentes valores de umidade de alimentação e de descarga desejados. Assim como ocorre no controle adaptativo de forma completamente automática, os parâmetros do controlador foram sintonizados em cada novo ensaio através de novas simulações em malha fechada envolvendo o modelo dinâmico do processo. Os lotes de folhas de erva-mate alimentados em diferentes momentos em uma condição particular de secagem tiveram suas umidades na descarga novamente determinadas off-line. A Tabela 3.3 apresenta um resumo das condições de operação empregadas nos ensaios de secagem em malha fechada com operação manual.

TABELA 3.3. Condições de operação manual dos ensaios para validar estratégia de controle de umidade de folhas de erva-mate no secador de esteira investigado.  $K_p=0,01 \text{ m s}^{-1}$

Ensaio	$M_F=M_{in}$ (b.s.)	$M_{sp}$ (b.s.)	$T_{SI}=T_{sin}$ (°C)	$Y_g$ (kg $\text{kg}^{-1}$ )	$T_g$ (°C)	$T_{gm}$ (°C)	$\tau_i$ (s)	$\tau_d$ (s)
1	1,43	1,0	31	0,016	$58,2 + 79,1x - 81,0x^2$	70,8	698	14477
2	1,14	0,7	30.5	0,016	$59 + 74,5x - 78,5x^2$	70,1	577	13677
3	1,42	0,9	30	0,013	$63,5 + 86,4x - 88,7x^2$	77,1	786	15022
4	0,9	0,6	28	0,013	$63,9 + 82,0x - 84,1x^2$	76,9	591	6675
5	1,71	0,9	27	0,016	$62,8 + 143,3x - 146,7x^2$	85,6	1088	22368
6	1,09	0,6	28	0,016	$56,3 + 170,9x - 171,8x^2$	84,5	1239	42122
7	1,21	0,6	30.5	0,012	$76,2 + 111,2x - 105,1x^2$	96,8	873	15510
8	0,48	0,2	30.5	0,012	$74,1 + 126,3x - 121,3x^2$	96,8	618	19256

### 3.4. Secagem e Aquecimento de Ramos de Erva-Mate

Dados de umidade e temperatura dos ramos de erva-mate em função do tempo foram obtidos com a esteira desligada. Para a realização dos ensaios foi construído um leito em armação de metal com área da base de 0,5 m de comprimento por aproximadamente 0,05 m de largura. O leito foi alimentado com uma única camada de ramos, inserido na câmara de secagem por uma abertura superior e acomodado sobre a esteira de teflon de modo que a extremidade anterior localizava-se a 0,25 m da entrada da câmara e a posterior a 0,75 m. Os ensaios de secagem e aquecimento foram conduzidos em momentos distintos nas condições reportadas na Tabela 3.4. Como é prontamente observado, foi realizado um total de 9 ensaios com variação de três níveis do diâmetro dos ramos e da temperatura de secagem ( $3^2$ ).

As curvas experimentais de umidade foram obtidas registrando-se a massa do leito por 7200 s, em intervalos regulares de 600 s. As massas do leito nos diferentes tempos de secagem, assim como a massa do leito seco, foram mensuradas com balança de quatro dígitos (Bioprecisa, FA2104), a qual localizava-se fora da câmara de secagem. Apesar do erro introduzido pela remoção das amostras da câmara de secagem para pesagem, este procedimento é considerado suficientemente rápido para assegurar reprodutibilidade das curvas de secagem (PANCHARIYA, POPOVIC e SHARMA, 2002). A diferença entre a massa de material sobre o leito e a massa de ramos secos, dividida pela massa de sólidos secos determina a umidade dos ramos em base seca. A massa do leito seco corresponde a massa do leito removido da câmara após 7200 s e deixado em estufa com controle PID de temperatura (SOLAB, SL100/100) a 105 °C até peso constante.

As temperaturas da superfície dos ramos foram medidas com frequência de 300 s por 7200 s, com o mesmo sensor de infravermelho reportado na seção 3.3 deste documento.

TABELA 3.4. Condições de operação empregadas nos ensaios para validação do modelo de secagem e aquecimento de ramos de erva-mate no secador de esteira com  $uc=0$

Ensaio	$D$ (m)	$T_{sin}$ (°C)	$M_{in}$ (b.s.)	$T_g$ (°C)	$T_{gm}$ (°C)	$LI$ (m)	$LS$ (m)
1	$3,5 \times 10^{-3}$	26,3	0,80			0,25	0,75
2	$6,5 \times 10^{-3}$	25,9	0,85	$66,6 + 7,8x - 18,6x^2$	65,5	0,25	0,75
3	$10 \times 10^{-3}$	25	0,89			0,25	0,75
4	$3,5 \times 10^{-3}$	25,3	0,72			0,25	0,75
5	$6,5 \times 10^{-3}$	26,2	0,75	$65,8 + 66,9x - 70,1x^2$	80,2	0,25	0,75
6	$10 \times 10^{-3}$	25,3	0,73			0,25	0,75
7	$3,5 \times 10^{-3}$	24,7	0,73			0,25	0,75
8	$6,5 \times 10^{-3}$	29,8	0,73	$76,8 + 37,1x - 42,7x^2$	83,8	0,25	0,75
9	$10 \times 10^{-3}$	27,1	0,71			0,25	0,75

### 3.5. Modelo Dinâmico para Secagem e Aquecimento de Folhas de Erva-Mate

O modelo para descrição do processo de secagem e aquecimento de folhas é representado pelas Equações (3.3) e (3.4), as quais são oriundas de um balanço de massa do soluto e de energia na fase sólida do secador (JENSEN, MELEIRO e ZANOELO, 2011).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -u_c \frac{\partial M}{\partial x} - C_s (M - M_e) \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = -u_c \frac{\partial T_s}{\partial x} - \frac{C_s (M - M_e)}{(Cp_{ss} + Cp_l M)} [Cp_v (T_g - T_s) + \Delta H_v - Cp_l T_s] + \frac{h_m (T_g - T_s)}{(Cp_{ss} + Cp_l M)} \quad (3.4)$$

Nas Equações (3.3) e (3.4) as propriedades termofísicas de folhas de erva-mate, tais como a umidade de equilíbrio e o calor específico das folhas secas de erva-mate, foram estimadas a partir de expressões empíricas

reportadas na literatura (ZANOELO, 2005; ZANOELO, BENINCÁ e RIBEIRO, 2011; JENSEN, MELEIRO e ZANOELO, 2011), mas que também são disponíveis no Capítulo de REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. Um coeficiente efetivo de transferência de calor constante que descreve corretamente o aumento de temperatura de folhas de erva-mate em um secador batelada de leito fino operando em condições análogas às correntemente consideradas foi adotado em todas as simulações (i.e.;  $h_m=181 \text{ J s}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ ) (JENSEN, MELEIRO e ZANOELO, 2011). As propriedades termodinâmicas do vapor d'água e da água líquida são extensivamente reportados na literatura e não serão novamente apresentados.

O coeficiente efetivo de transporte de massa ( $C_s$ ) foi estimado pela equação empírica de Panchariya (PANCHARIYA, POPOVIC e SHARMA, 2002) modificada (TUSSOLINI *et al.*, 2014) (Equação 3.5). A modificação foi proposta no intuito de estender a validade da correlação a uma faixa mais ampla de velocidades ( $\approx 0,075\text{-}0,65 \text{ m s}^{-1}$ ) sem alterar a consistência da mesma no intervalo de condições para a qual a mesma foi originalmente proposta (TUSSOLINI *et al.*, 2014) ( $u_g$ :  $0,25\text{-}0,65 \text{ m s}^{-1}$  e  $T_g$ :  $80\text{-}120 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

$$C_s = 10^{-6} (T_g)^{2,08} (\mu_g)^{1,11} + (2,95 \times 10^{-5} T_g - 1,73 \times 10^{-3}) \exp[(0,46 T_g - 61,15) \mu_g] \quad (3.5)$$

O sistema de equações diferenciais parciais que caracteriza o modelo transiente unidimensional de secagem foi resolvido com o método numérico das linhas envolvendo uma fórmula de diferenças finitas para trás para representar as derivadas espaciais e no tempo. Uma rotina computacional em FORTRAN foi escrita para implementação do método numérico. Os parâmetros do controlador foram ajustados com o método simplex de otimização de modo a minimizar o somatório ao quadrado dos resíduos (método ISE).

$$ISE = \int_0^{\infty} [\varepsilon(t)]^2 dt \quad (3.6)$$

### 3.6. Modelagem do Aquecimento e Secagem de Ramos de Erva-Mate

No caso de folhas de erva-mate, optou-se neste trabalho por descrever a transferência de calor e massa através de um modelo onde os parâmetros de transporte representam combinações de diferentes mecanismos. Neste tipo de procedimento a importância relativa da transferência de calor e massa a nível molecular (condução e difusão) e macroscópico (convecção) não é levada em consideração, e por consequência não é discutida.

Uma abordagem completamente distinta foi adotada para descrever o aquecimento e secagem de ramos. Por exemplo, assumiu-se que a transferência de calor nos ramos de erva-mate é exclusivamente governada pela convecção e a taxa de aquecimento é descrita pela lei de Newton do resfriamento/aquecimento (termo do lado direito da igualdade no balanço de energia no ramo representado pela Equação 3.7).

$$\frac{d}{dt}(m_p C_{p_p} T_p) = -hA(T_p - T_g) \quad (3.7)$$

O lado esquerdo da Equação (3.7), que representa o termo de acúmulo de energia, pode ser reescrito em termos de densidade do ramo. Neste caso, considerando-se um valor médio de densidade e calor específico, e desprezando-se o encolhimento do material, obtém-se a Equação (3.8), cuja solução é facilmente alcançada pois trata-se de uma equação diferencial ordinária (EDO) de primeira ordem separável.

$$\frac{dT_p}{dt} = -\frac{hA}{C_{p_{pm}} \rho_{pm} V} (T_p - T_g) \quad (3.8)$$

Resolvendo-se a EDO e aplicando-se a condição inicial ( $T_p = T_{pin}$ ) obtém-se uma equação algébrica explícita na variável de interesse (Equação 3.9):

$$T_p = T_g + (T_{pin} - T_g) \exp(-h_{pm} t) \quad (3.9)$$

onde  $h_{pm}$  é dado por:

$$h_{pm} = \frac{hA}{Cp_{pm}\rho_{pm}V} \quad (3.10)$$

Sendo assim, uma vez conhecido o coeficiente  $h$ , a densidade e calor específico médios do produto, e a relação área superficial sobre volume dos ramos ( $4/D$ ), a Equação (3.9) pode ser prontamente empregada para descrever o aquecimento dos ramos durante o processo de secagem de erva-mate.

Com base nos perfis de temperatura obtidos experimentalmente, o coeficiente convectivo  $h$  foi ajustado através do método de Levenberg-Marquardt utilizando o somatório do quadrado dos resíduos como função objetivo. O calor específico e a densidade média dos ramos foram respectivamente estimados com as Equações (2.4) e (2.5) (SCHMALKO, PERALTA e ALZAMORA, 2007) em um valor médio experimental de umidade do ramo.

A hipótese de que a condução de calor desempenha um papel irrelevante na cinética de aquecimento é baseada na estimativa do número de *Biot* definido pela Equação (3.11), onde  $h$  é o coeficiente convectivo de transporte de calor,  $R$  é o raio do ramo (direção característica de transporte, visto que o ramo é um cilindro longo) e  $k_p$  é a condutividade do ramo.

$$Biot = \frac{hR}{k_p} \quad (3.11)$$

A fim de se estimar  $h$  nas condições experimentais investigadas, utilizou-se a Equação (3.12) para escoamento de gases normal a cilindro (BENNETT e MYERS, 1978), onde a velocidade e as propriedades termofísicas do ar de secagem podem ser calculadas através das Equações (3.1) e (2.6), respectivamente.

$$\frac{hD}{k_g} = 0,821 \left( \frac{Du_g \rho_g}{\mu_g} \right)^{0,385} \quad (3.12)$$

Segundo a Equação (3.12), o coeficiente convectivo varia de aproximadamente 9,8 a 19,3 W m<sup>-2</sup> °C<sup>-1</sup> no intervalo de temperatura entre 65,5 e 83,8 °C ( $T_{gm}$  na câmara de aquecimento e secagem dos ramos). Sendo assim, mesmo considerando a condição que propicia o maior *Biot*, isto é, máximo  $h$  (19,3 W m<sup>-2</sup> °C) e  $R$  (5,0×10<sup>-3</sup> m), e mínimo  $k_p$  (0,175 W m<sup>-1</sup> °C) (SCHMALKO, MORAWICKI e RAMALLO, 1997; ZANOELO, BENINCÁ e RIBEIRO, 2011), um *Biot* de aproximadamente 0,55 é obtido. Da solução analítica da equação de transporte de calor transiente e unidimensional em cilindro longo com resistência convectiva como condição de contorno (ARPACI, 1966; SISSOM e PITTS, 1979), ou de cartas construídas a partir destas soluções, sabe-se que nesta situação a máxima diferença de temperatura no interior do cilindro não será superior a 20 % em qualquer tempo. Em resumo, pode-se supor com certo grau de confiança que a resistência a transferência de calor convectiva é de muito superior a resistência por condução, e portanto todo o calor transferido para a superfície é instantaneamente distribuído no interior do cilindro.

Para secagem dos ramos foi por sua vez adotado um modelo puramente difusivo que envolve a aplicação da 2ª Lei de Fick para transporte de massa transiente e unidimensional em um cilindro de comprimento infinito. Neste caso, o transporte de água do sólido para o seio da fase gás ocorre na direção  $r$  (laterais do cilindro) e é governado pela Equação (3.13), onde  $D_a$  é a difusividade da água nos ramos de erva-mate.

$$\frac{\partial M_p}{\partial t} = D_a \left( \frac{\partial^2 M_p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial M_p}{\partial r} \right) \quad (3.13)$$

A solução da Equação (3.13) foi obtida pelo método do produto ou separação de variáveis. Adotando-se este procedimento a equação diferencial parcial (EDP) acima foi reduzida a uma EDO em  $t$  de primeira ordem separável,

cuja solução é imediata, e a uma EDO em  $r$  de segunda ordem com coeficiente variáveis. Esta segunda EDO é a equação de Bessel de ordem zero, a qual deve ser resolvida por série de potências em torno de um ponto singular (teorema de Frobenius). O produto das soluções das duas EDOs em termos de uma variável adimensional de umidade representa a solução da Equação (3.13):

$$MR(r,t) = \exp^{-\lambda^2 D_a t} [A J_0(\lambda r) + B Y_0(\lambda r)] \quad (3.14)$$

onde  $MR$  é definido em (3.15),  $J_0$  é função de Bessel de primeira espécie de ordem zero e  $Y_0$  é a função de Bessel de segunda espécie de ordem zero.

$$MR = \frac{M_p - M_{pe}}{M_{pin} - M_{pe}} \quad (3.15)$$

As constantes  $\lambda$ ,  $A$  e  $B$  na Equação (3.14) são determinadas aplicando-se as seguintes condições de contorno: i) em  $r=0$  (centro do cilindro)  $\rightarrow MR=\text{finito}$ ; ii) em  $r=R$  (superfície lateral externa do cilindro)  $\rightarrow MR=0$ ; iii) em  $t=0 \rightarrow MR=1$ , o que resulta na solução definitiva da EDP em questão:

$$\frac{M_p(r,t) - M_{pe}}{M_{pin} - M_{pe}} = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{2}{\gamma_n} \right) \frac{J_0(\gamma_n r/R)}{J_1(\gamma_n)} \exp\left( \frac{-\gamma_n^2 D_a t}{R^2} \right) \quad (3.16)$$

ou

$$\frac{M_p(r,t) - M_{pe}}{M_{pin} - M_{pe}} = \frac{2}{R} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\lambda_n r)}{\lambda_n J_1(\lambda_n R)} \exp(-\lambda_n^2 D_a t) \quad (3.17)$$

onde  $\lambda_n (= \gamma_n/R)$  são as raízes de  $J_0(\lambda_n r)$ .

O valor médio de umidade, assumindo-se que a transferência de massa ocorre somente pelas laterais do cilindro que representa os ramos de erva-mate, é obtido por integração das Equações (3.16) ou (3.17) na direção  $\theta$  e  $r$ .



$$\frac{M_{pm}(t) - M_{pe}}{M_{pin} - M_{pe}} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \int_0^{2\pi} \left\{ r \left[ \frac{M_p(r, t) - M_{pe}}{M_{pin} - M_{pe}} \right] \right\} d\theta dr \quad (3.18)$$

cuja solução é dada por:

$$\frac{M_{pm}(t) - M_{pe}}{M_{pin} - M_{pe}} = \frac{4}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{(\lambda_n)^2} \exp \left[ -D_a t (\lambda_n)^2 \right] \right\} \quad (3.19)$$

onde  $n$  são inteiros positivos.

A consideração de que a difusão é que controla o processo de secagem nasce essencialmente da analogia entre calor e massa de Chilton-Colburn (SISSOM e PITTS, 1979). Segundo esta analogia o número de Nusselt, termo do lado esquerdo da Equação (3.12) ( $Nu = hD/k_g$ ), deveria ser igual ao número de Sherwood, dado por:

$$Sh = \frac{k_c D}{D_v} \quad (3.20)$$

onde  $k_c$  é o coeficiente convectivo de transporte de massa ( $m \, s^{-1}$ ) e  $D_v$  é a difusividade do vapor d'água no ar ( $m^2 \, s^{-1}$ ). Cabe ressaltar que esta hipótese é consistente com a analogia de Chilton-Colburn dada pela Equação (3.21) ou (3.22) somente se o número de Lewis ( $= Sc/Pr$ ) elevado na um terço for aproximadamente igual a unidade. No presente caso  $(Le)^{1/3}$  é aproximadamente 0,94, logo, valores de  $k_c$  podem ser obtidos simplesmente substituindo-se  $Nu$  por  $Sh$  na Equação (3.12) e rearranjando-se a expressão de modo a isolar a variável de interesse, como demonstrado na Equação (3.23). De forma alternativa o coeficiente de transporte de massa poderia ser estimado pelas Equações (3.21) ou (3.22) sem restrições, ou a partir de uma correlação empírica para transferência de massa no escoamento sobre um único cilindro apresentada em forma gráfica na literatura (SISSOM e PITTS, 1979).

$$\frac{Sh}{Nu} = \left( \frac{Sc}{Pr} \right)^{1/3} \quad (3.21)$$

$$\frac{k_c}{u_g} (Sc)^{2/3} = \frac{h}{Cp_g \rho_g u_g} (Pr)^{1/3} \quad (3.22)$$

$$k_c = 0,821 \left( \frac{Du_g \rho_g}{\mu_g} \right)^{0,385} \frac{D_v}{D} \quad (3.23)$$

A partir da Equação (3.23) obtém-se valores de  $k_c$  que variam entre  $7,34 \times 10^{-3}$  e  $3,51 \times 10^{-2}$  para  $Re$  entre 13,4 e 39,4, assumindo-se  $D_v$  estimado pela Equação (3.24) no intervalo de temperatura entre 65,5 e 83,8 °C ( $3,29 \times 10^{-5}$  -  $3,64 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ). A Equação (3.24) é uma relação semi-empírica adaptada da literatura para cálculo da difusividade de vapor d'água no ar no sistema internacional de unidades, ao invés do sistema inglês, como originalmente apresentada (SISSOM e PITTS, 1979). Embora seja uma equação pouco usual, gera valores de difusividade que são análogos a clássica equação para cálculo da mesma propriedade para sistemas binários em função da massa molecular e volume atômico ou molecular das espécies gasosas envolvidas (ex.; BENNETT e MYERS, 1978).

$$D_v = \frac{3,817 \times 10^{-4} (1,8T_g + 492)^{2,5}}{p (1,8T_g + 933)} \quad (3.24)$$

Valores de  $Fo$  (número de Fourier) da ordem de 5374 a 365625 são finalmente obtidos a partir da Equação (3.25), o que indica que as resistências difusivas são muito superiores as resistências ao transporte de massa por convecção nas condições investigadas de secagem de ramos.

$$Fo = \frac{k_c R}{D_a} \quad (3.25)$$

A difusividade da água nos ramos foi estimada com uma correlação empírica reportada na literatura (Equação 3.26) (SCHMALKO e ALZAMORA, 2005; SCHMALKO, PERALTA e ALZAMORA, 2007). Convém esclarecer que os autores que propõe esta equação tratam os ramos como um material compósito, e sugerem que a resistência difusiva seria dada por uma combinação em série das resistências no xilema e na casca (SCHMALKO, PERALTA e ALZAMORA, 2007). Entretanto, se o cilindro for tratado como uma placa plana de largura igual ao diâmetro, e espessura igual ao raio (o que é gerado por um corte longitudinal no cilindro de profundidade igual ao raio e desdobramento na direção radial), o somatório das resistências é dado pela Equação (3.27). Como o raio do ramo com casca é aproximadamente igual ao raio do xilema ( $R \approx R_x$ ) (isto é, a espessura da casca é muito menor que o raio do xilema), a resistência difusiva passa a ser determinada exclusivamente pela resistência ao transporte de massa no xilema.

Em resumo, a difusividade da água no ramo ( $D_a$ ) é aproximadamente igual a difusividade da água no xilema ( $D_{ax}$ ), dada pela Equação (3.26). Na Equação (3.26) assumiram-se valores médios de umidade determinados experimentalmente (0,52-0,79) e  $T_p = T_{gm}$ , isto é, a difusividade da água foi calculada em uma condição de equilíbrio térmico.

$$D_a = 1,24 \times 10^{-7} (1 + 0,75 M_{pm}) \exp\left(\frac{-2270}{T_p + 273,15}\right) \exp\left(\frac{824}{D}\right) \quad (3.26)$$

$$\sum \Omega = \frac{R_x}{D_{ax}A} + \frac{R - R_x}{D_{ac}A} \approx \frac{R_x}{D_{ax}A} \approx \frac{R}{D_{ax}A} \quad (3.27)$$

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados experimentais e de modelagem da secagem e aquecimento de folhas (secção 4.1) e ramos de erva-mate (secção 4.2). Na seção 4.1 estão os resultados dos ensaios de calibração da esteira; curvas de umidade das folhas na descarga do secador em função de  $\tau$ ; curvas cinéticas de umidade e temperatura das folhas; e curvas de validação de estratégias de controle por realimentação. Na seção 4.2 são reportadas curvas de umidade e temperatura dos ramos em função do tempo.

### 4.1. Folhas de Erva-Mate

A Figura 4.1 apresenta uma curva de calibração que permite correlacionar o sinal do potenciômetro com a velocidade da esteira. Como esperado existe uma dependência linear entre estas variáveis, a qual é bem descrita ( $R^2=0,999$ ) pela Equação (4.1), cuja validade se estende a valores de  $S$  entre 30 e 100%.

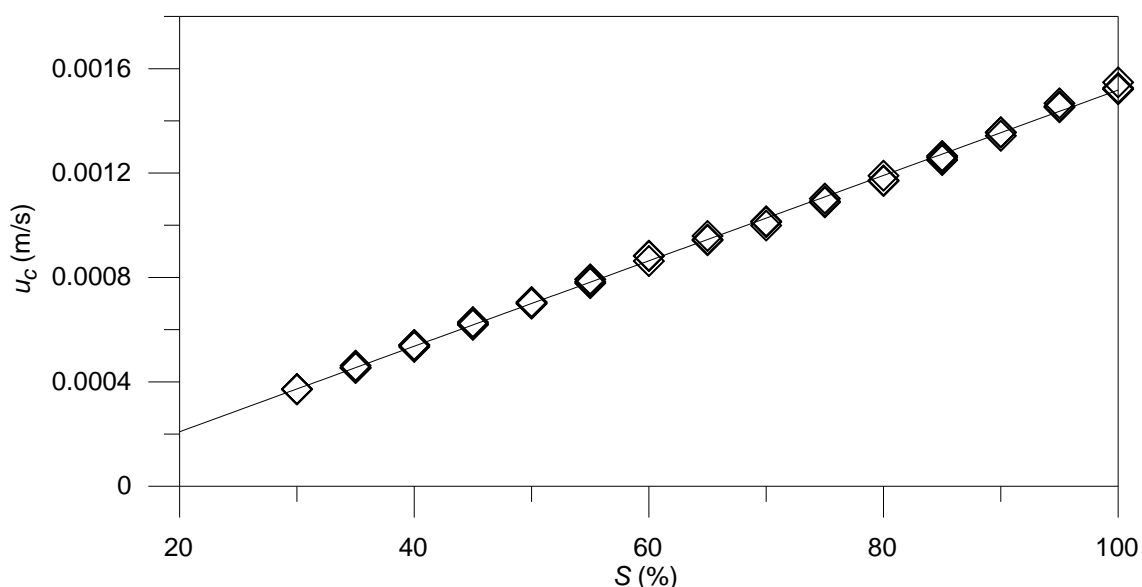


FIGURA 4.1. Curva de calibração da velocidade da esteira em função do sinal do potenciômetro ( $S$ ). Símbolos: resultados experimentais; linha sólida: Equação (4.1).

$$u_c = 1,636 \times 10^{-5} S - 1,181 \times 10^{-4} \quad (4.1)$$

As Figuras 4.2 a 4.6 evidenciam um aspecto interessante do secador de esteira utilizado para os ensaios de secagem. Como é possível observar, um perfil parabólico de temperatura do gás é encontrado ao longo do secador. Este fato é parcialmente atribuído a alimentação do ar quente em apenas dois pontos do secador, mas também ao comprimento do secador, o qual provoca um efeito de extremidade com consequente redução da temperatura nas regiões próximas a entrada e saída da câmara. Este modelo de variação de temperatura do gás foi observado em todos os experimentos realizados, por esta razão todos os resultados experimentais e calculados virão acompanhados também de um polinômio de segundo grau com coeficientes ajustados de forma a reproduzir o perfil experimental de temperatura do gás.

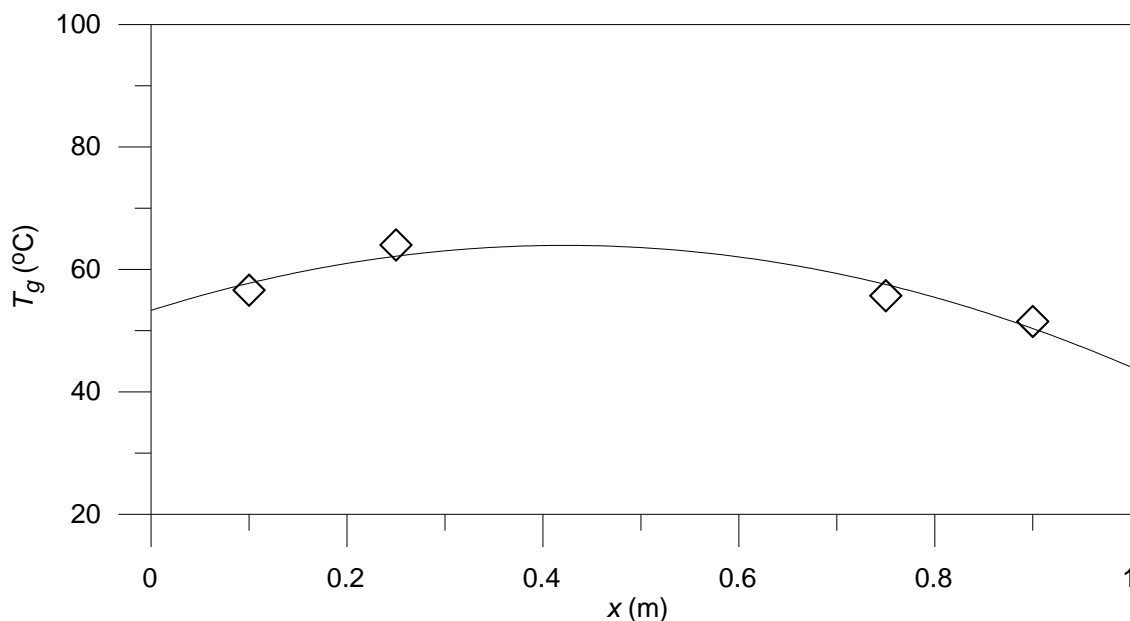


FIGURA 4.2. Perfil parabólico de temperatura do gás de secagem ao longo da direção axial do secador para o ensaio de secagem 1 da Tabela 3.1. Símbolos: resultados experimentais; linha sólida:  $T_g = 53,3 + 50,2x - 59,5x^2$ .

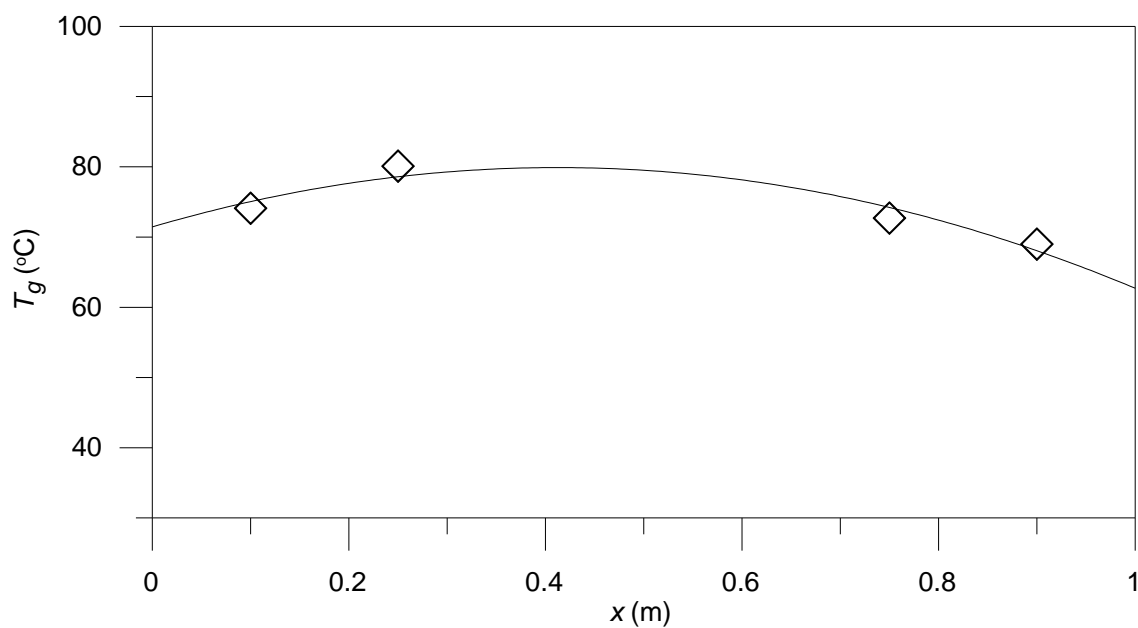


FIGURA 4.3. Perfil parabólico de temperatura ao longo da direção axial do secador para o ensaio de secagem 2 da Tabela 3.1. Símbolos: resultados experimentais; linha sólida:  $T_g = 71,4 + 41,0x - 49,7x^2$ .

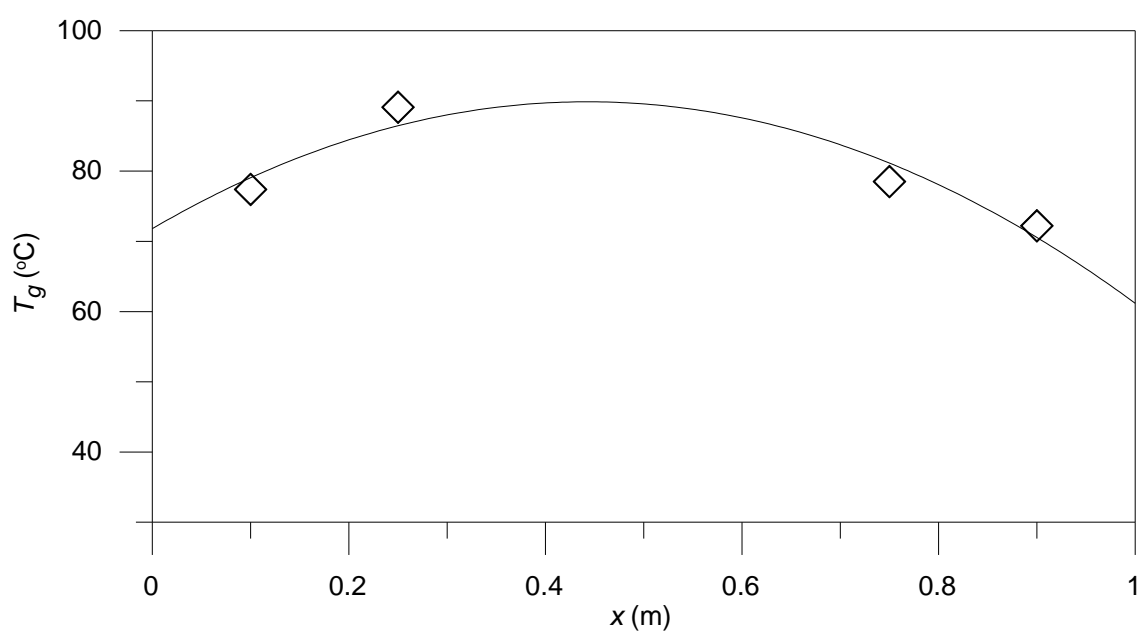


FIGURA 4.4. Perfil parabólico de temperatura ao longo da direção axial do secador para o ensaio de secagem 3 da Tabela 3.1. Símbolos: resultados experimentais; linha sólida:  $T_g = 71,8 + 81,7x - 92,3x^2$ .

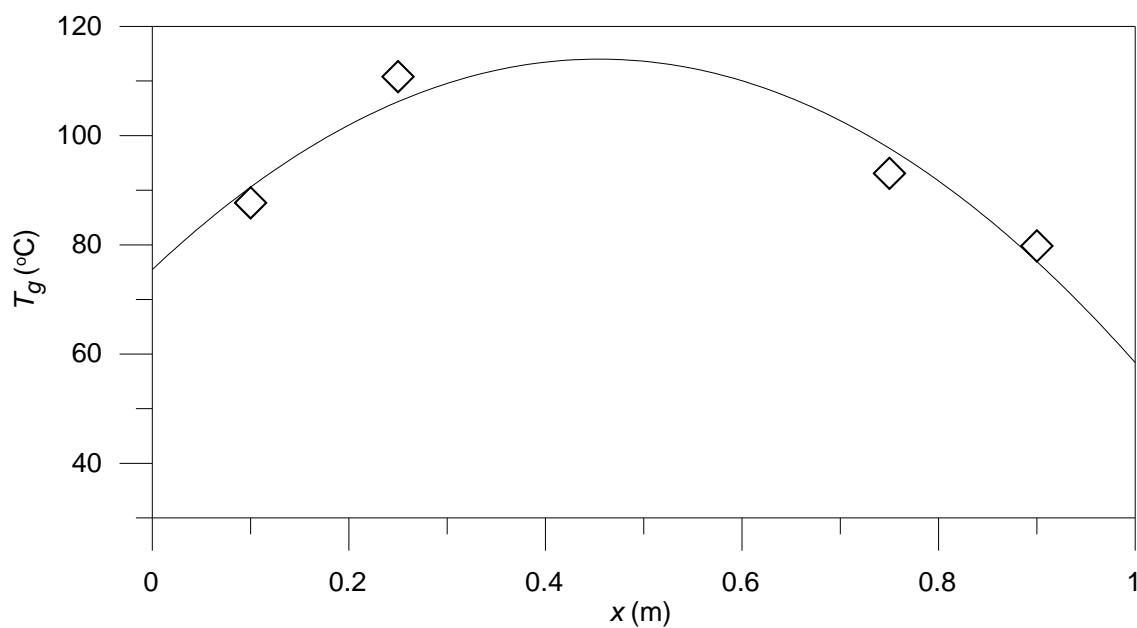


FIGURA 4.5. Perfil parabólico de temperatura ao longo da direção axial do secador para o ensaio de secagem 4 da Tabela 3.1. Símbolos: resultados experimentais; linha sólida:  $T_g = 75,5 + 169,6x - 186,7x^2$

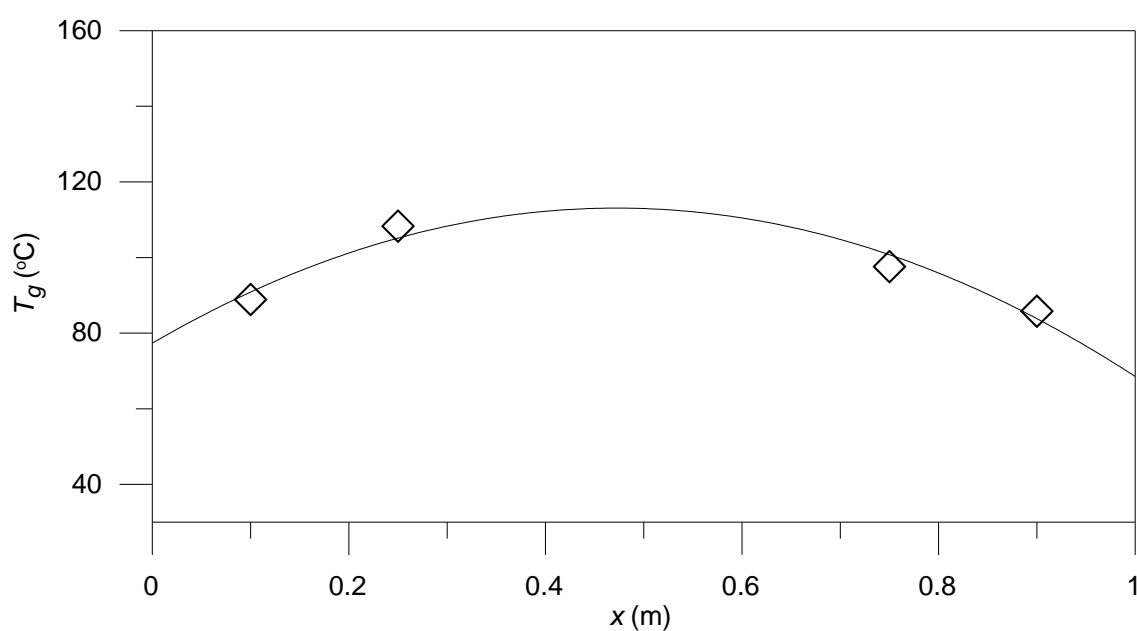


FIGURA 4.6. Perfil parabólico de temperatura ao longo da direção axial do secador para o ensaio de secagem 5 da Tabela 3.1. Símbolos: resultados experimentais; linha sólida:  $T_g = 77,3 + 151,2x - 160,0x^2$

As Figuras 4.7 a 4.11 apresentam dados experimentais e calculados de umidade na descarga do secador em diferentes tempos de residência e temperaturas médias. Como rapidamente mencionada na secção 3.3, os resultados experimentais reportados nestas figuras foram essencialmente obtidas para calibração do modelo. De fato, observa-se que a utilização do coeficiente efetivo de transporte de massa dado por Panchariya (PANCHARIYA, POPOVIC e SHARMA, 2002) (Equação 3.5 com 2º termo da soma igual a zero) gera valores calculados que subestimam a taxa de secagem. Prontamente percebeu-se que este comportamento é atribuído a faixa de validade da equação empírica de Panchariya, a qual, como já mencionado, foi sugerida com o propósito de aplicação em uma faixa de velocidades do ar igual a 0,25-0,65 m s<sup>-1</sup>. Entretanto, nas condições destes ensaios a velocidade do ar estava bem abaixo destes valores (0,075-0,095 m s<sup>-1</sup>) (ver Equação 3.1).

Neste sentido, com o propósito de calibração do modelo, a correlação empírica de Panchariya foi modificada. Detalhes desta modificação que resulta na Equação (3.5) são reportados em um artigo deste autor (TUSSOLINI *et al.*, 2014). De qualquer forma, em resumo pode-se dizer que o 2º termo da Equação (3.5) foi adicionado com parâmetros ajustados com o método Simplex de otimização a fim de minimizar o somatório do quadrado dos resíduos para umidade reportados nas Figuras 4.7 a 4.11.

O bom acordo entre resultados experimentais e estimados com a equação para cálculo de  $C_s$  modificada (TUSSOLINI *et al.*, 2014), indicados por um coeficiente de determinação igual a 0,96 e um desvio médio relativo igual a apenas 11 %, corrobora o procedimento de correção do modelo. Em outras palavras, a adoção do coeficiente efetivo de transporte de massa dado pela Equação (3.5) permite a estimativa correta da taxa de secagem de folhas de erva-mate em velocidades próximas as utilizadas nesta investigação (isto é; aproximadamente 0,075 a 0,095 m s<sup>-1</sup>).

Ainda que o modelo para secagem de folhas não se proponha a detalhar os mecanismos de transporte de calor e massa envolvidos, o fato da velocidade ter um efeito significativo implica que a convecção não pode ser negligenciada. De fato, este elemento confirma evidências anteriormente



reportadas na literatura de que a secagem de folhas é governada por uma combinação de transporte de massa por difusão e convecção (TEMPLE e VAN BOXTEL, 1999b; PANCHARIYA, POPOVIC e SHARMA, 2002).

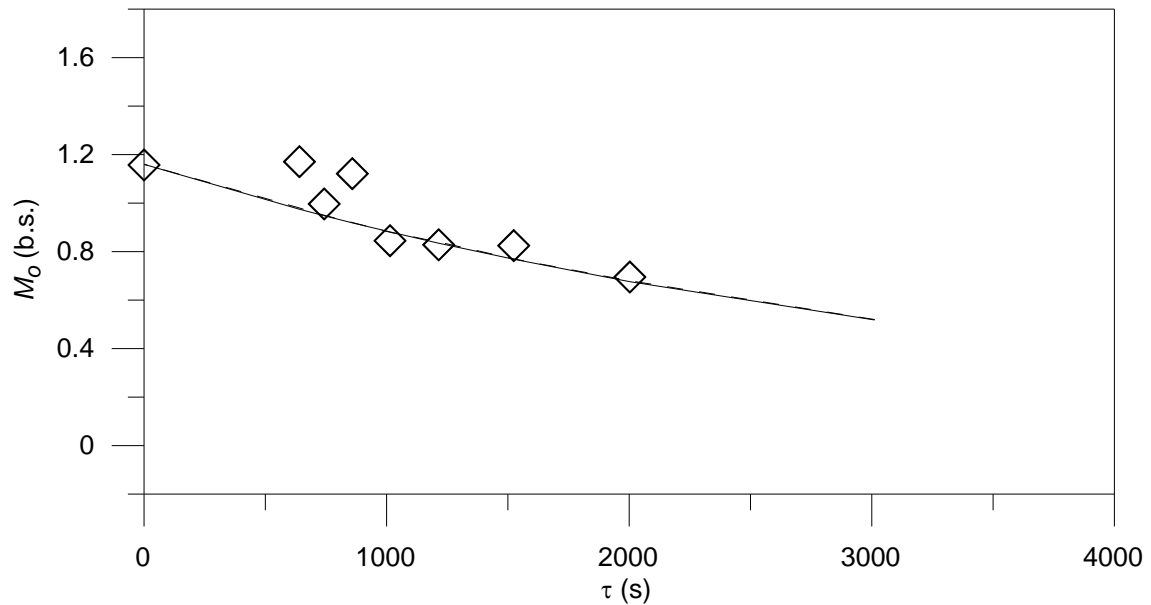


FIGURA 4.7. Umidade experimental (símbolos) e calculada (linhas) de descarga da erva-mate em diferentes tempos de residência da esteira a  $T_{gm}=55,6$  °C (perfil de  $T_g$  na Figura 4.2). Condição de operação: ensaio 1 da Tabela 3.1. Linha tracejada:  $C_s$  original; linha sólida:  $C_s$  modificada.

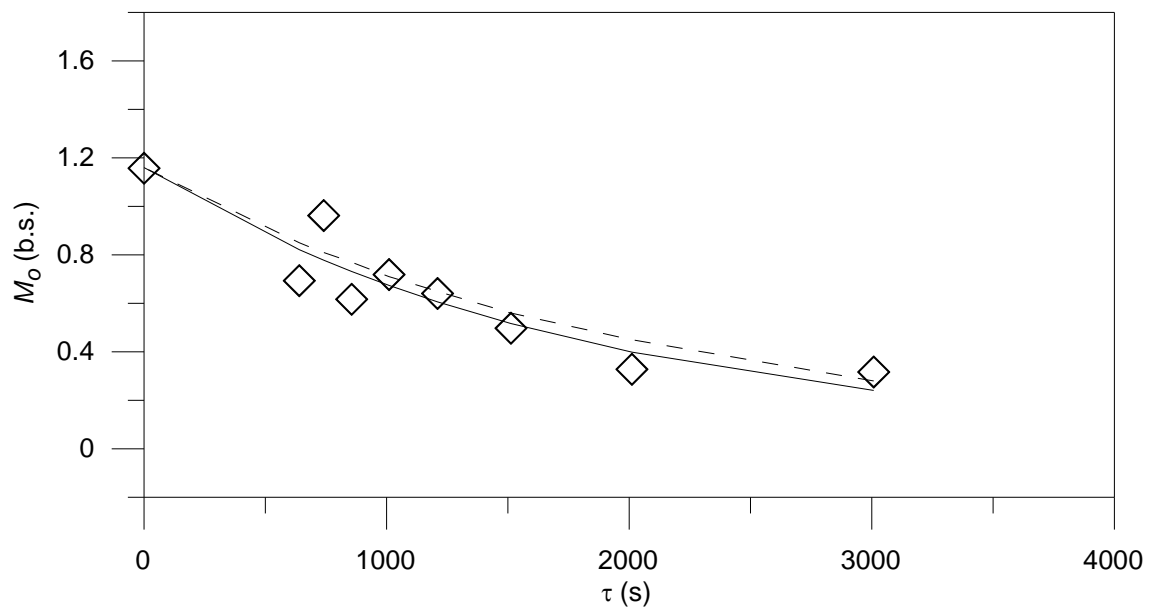


FIGURA 4.8. Umidade experimental (símbolos) e calculada (linhas) de descarga da erva-mate em diferentes tempos de residência da esteira a  $T_{gm}=75,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (perfil de  $T_g$  na Figura 4.3). Condição de operação: ensaio 2 da Tabela 3.1. Linha tracejada:  $C_s$  original; linha sólida:  $C_s$  modificada.

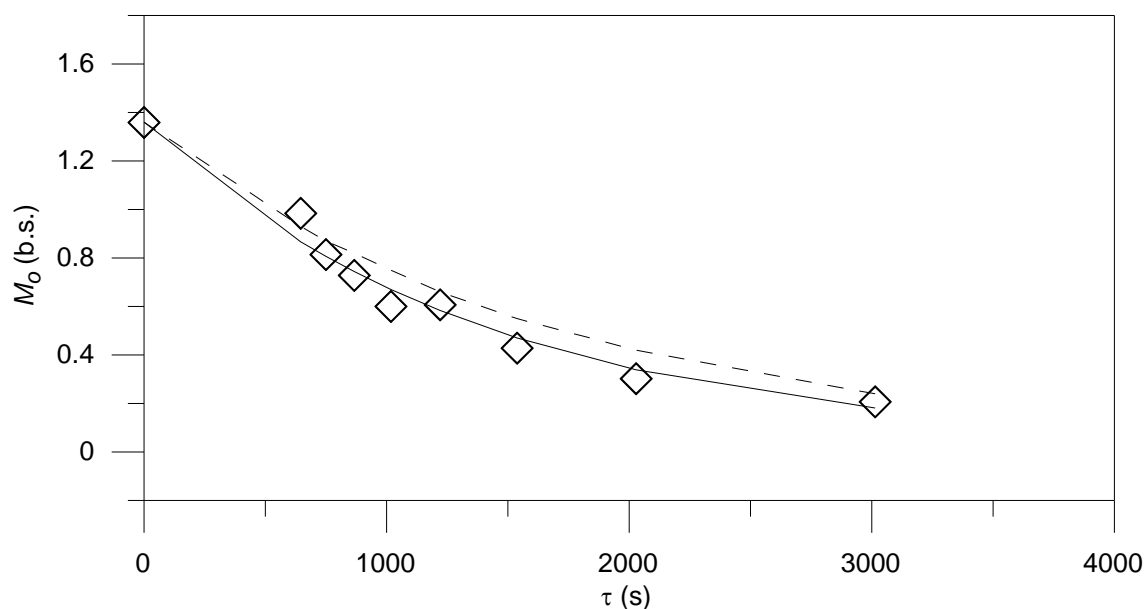


FIGURA 4.9. Umidade experimental (símbolos) e calculada com  $C_s$  (linhas) de descarga da erva-mate em diferentes tempos de residência da esteira a  $T_{gm}=81,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  (perfil de  $T_g$  na Figura 4.4). Condição de operação: ensaio 3 da Tabela 3.1. Linha tracejada:  $C_s$  original; linha sólida:  $C_s$  modificada.

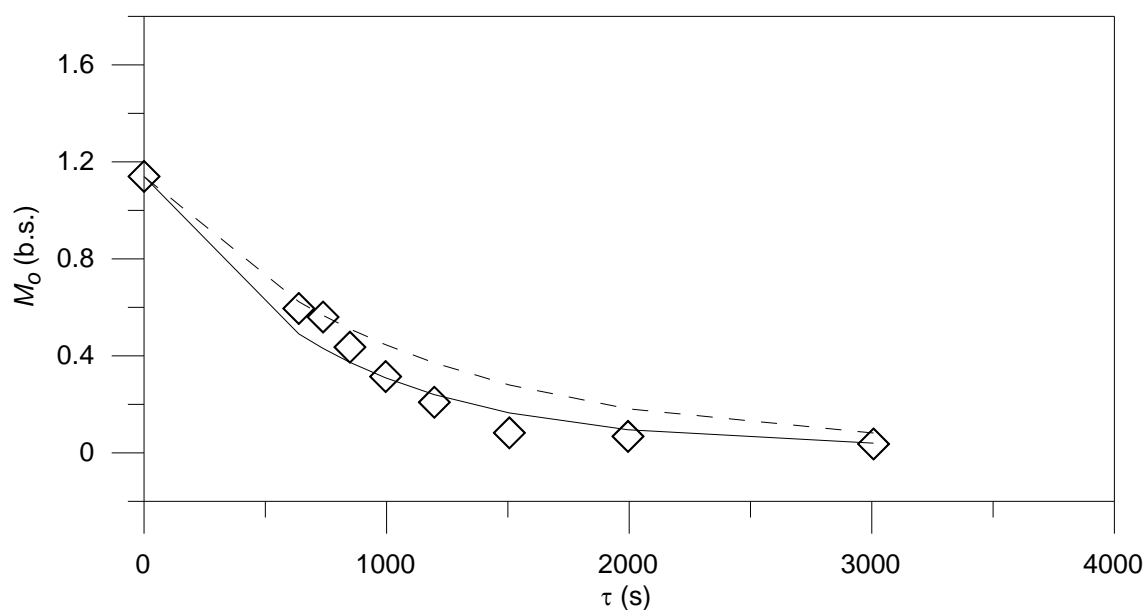


FIGURA 4.10. Umidade experimental (símbolos) e calculada (linhas) de descarga da erva-mate em diferentes tempos de residência da esteira a  $T_{gm}=98,1$  °C (perfil de  $T_g$  na Figura 4.5). Condição de operação: ensaio 4 da Tabela 3.1. Linha tracejada:  $C_s$  original (PANCHARIYA, POPOVIC e SHARMA, 2002); linha sólida:  $C_s$  modificada (TUSSOLINI *et al.*, 2014).

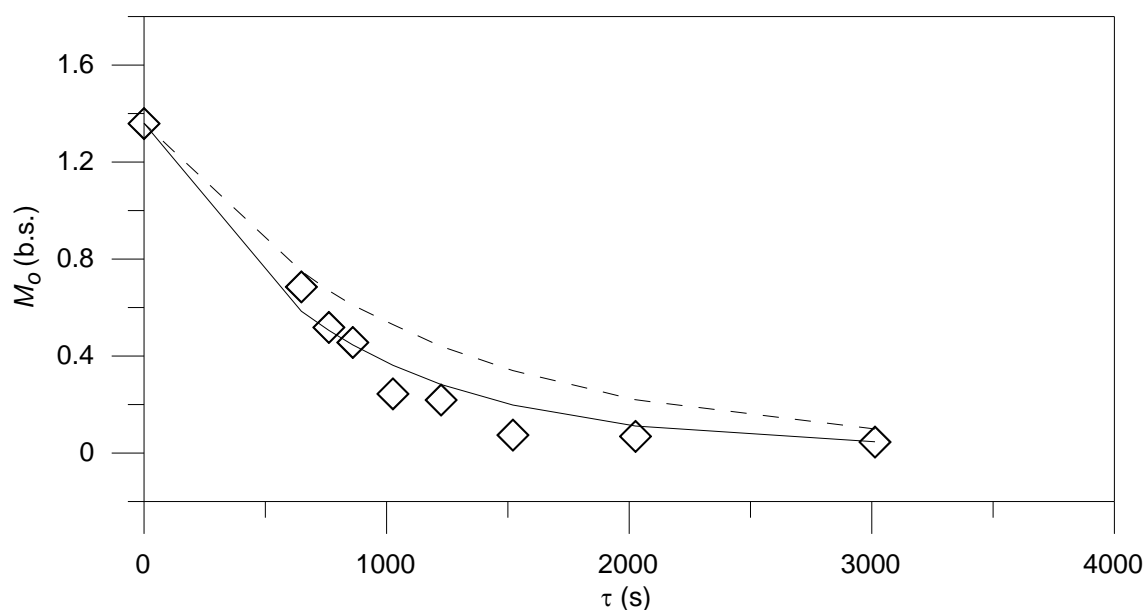


FIGURA 4.11. Umidade experimental (símbolos) e calculada (linhas) de descarga da erva-mate em diferentes tempos de residência da esteira a  $T_{gm}=99,6$  °C (perfil de  $T_g$  na Figura 4.6). Condição de operação: ensaio 5 da Tabela 3.1. Linha tracejada:  $C_s$  original (PANCHARIYA, POPOVIC e SHARMA, 2002); linha sólida:  $C_s$  modificada (TUSSOLINI *et al.*, 2014).

Um grande grupo adicional de resultados experimentais de umidade e temperatura de folhas de erva-mate foi utilizado para validar o modelo de secagem e aquecimento de folhas. Como anteriormente reportado, os dados de umidade foram obtidos quando um leito estacionário de folhas, formado entre 0,25 e 0,75 m da entrada do secador de esteira, foi deixado por 7200 s na câmara de secagem. Resultados transientes de umidade foram então obtidos em diferentes temperaturas médias e são reportados nas Figuras 4.12 a 4.17

Um procedimento ligeiramente diferente foi adotado quando o propósito foi monitorar a variação de temperatura de folhas de erva-mate *in natura*

alimentadas no secador a temperatura ambiente. Neste caso, as temperaturas foram medidas em diferentes posições axiais por movimento da esteira, sobre a qual um leito delgado de folhas havia sido formado. As Figuras 4.18 a 4.23 reportam a variação de temperatura de folhas alimentadas em uma das extremidades do secador em diferentes temperaturas médias.

Em ambos os conjuntos de curvas (isto é, de umidade e temperatura), em qualquer que fosse a condição de operação (reportadas na Tabela 3.2), o modelo sugerido foi capaz de reproduzir corretamente os resultados experimentais.

O efeito positivo da temperatura média sobre a taxa de secagem e de aquecimento (i.e.; as diferentes inclinações nos diagramas de  $M$  contra  $t$ , e  $T_s$  versus  $x$  nas diferentes temperaturas médias), foram também estimadas pelo modelo. Este comportamento está em total acordo com evidências anteriores reportadas na literatura para secagem em secadores de camada fina de diferentes materiais, como o trigo (HEMIS *et al.*, 2009; St. GEORGE e CENKOWSKI., 2009).

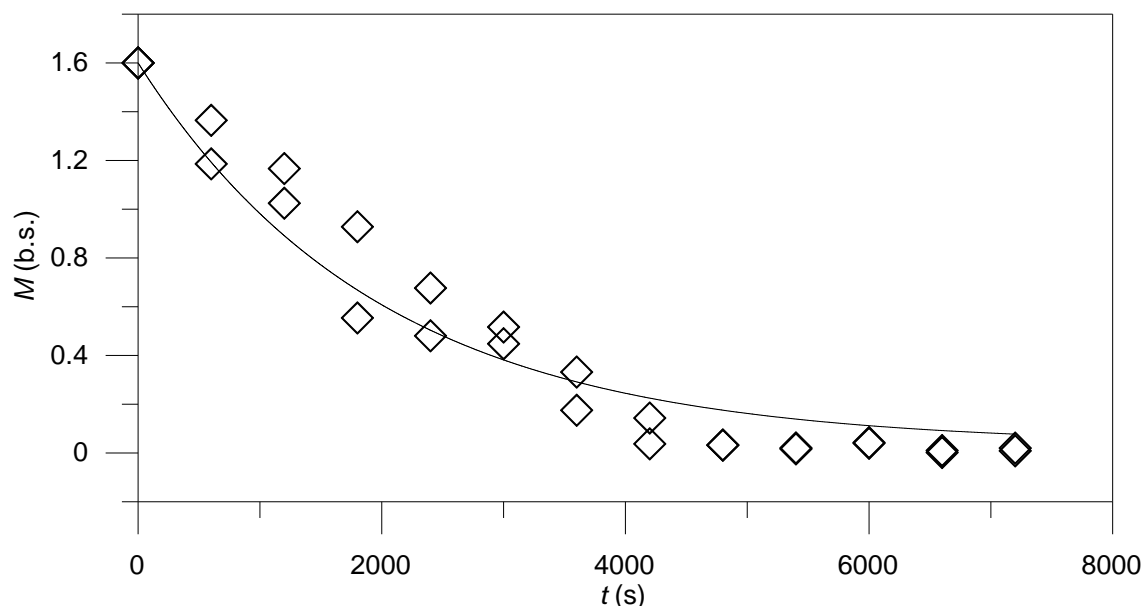


FIGURA 4.12. Comparação entre curvas experimentais (símbolos) e calculada (linha sólida) de secagem de erva-mate em secador batelada a 72,9 °C. Condição de operação: ensaio 1 da Tabela 3.2.

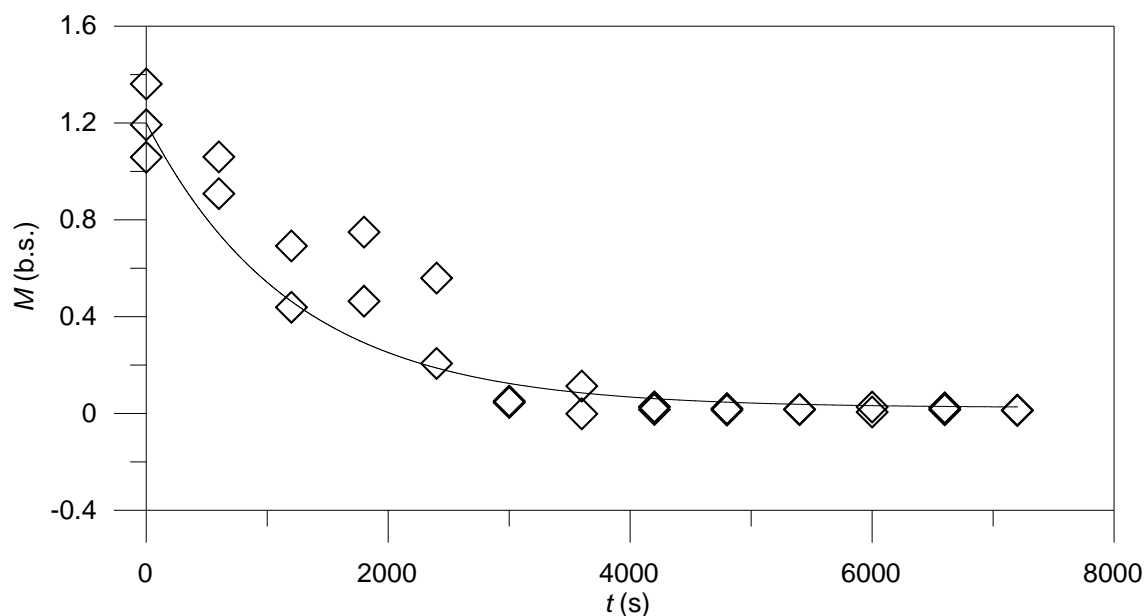


FIGURA 4.13. Comparação entre curvas experimentais (símbolos) e calculada (linha sólida) de secagem de erva-mate em secador batelada a 86,6 °C. Condição de operação: ensaio 2 da Tabela 3.2.

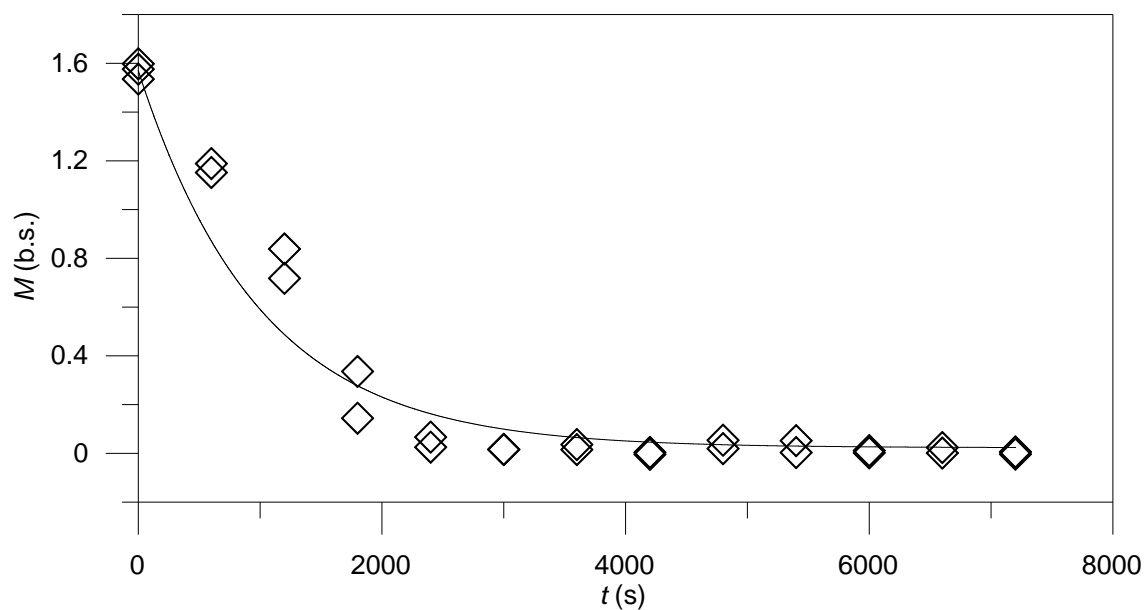


FIGURA 4.14. Comparação entre curvas experimentais (símbolos) e calculada (linha sólida) de secagem de erva-mate em secador batelada a 92,5 °C. Condição de operação: ensaio 3 da Tabela 3.2.

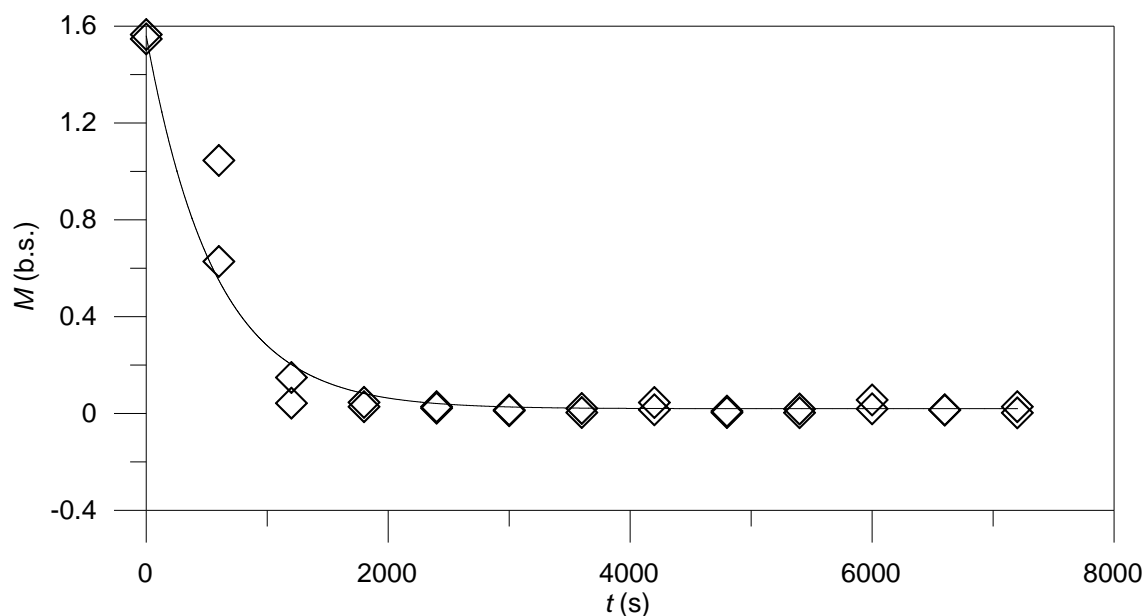


FIGURA 4.15. Comparação entre curvas experimentais (símbolos) e calculada (linha sólida) de secagem de erva-mate em secador batelada a 109,7 °C. Condição de operação: ensaio 4 da Tabela 3.2.

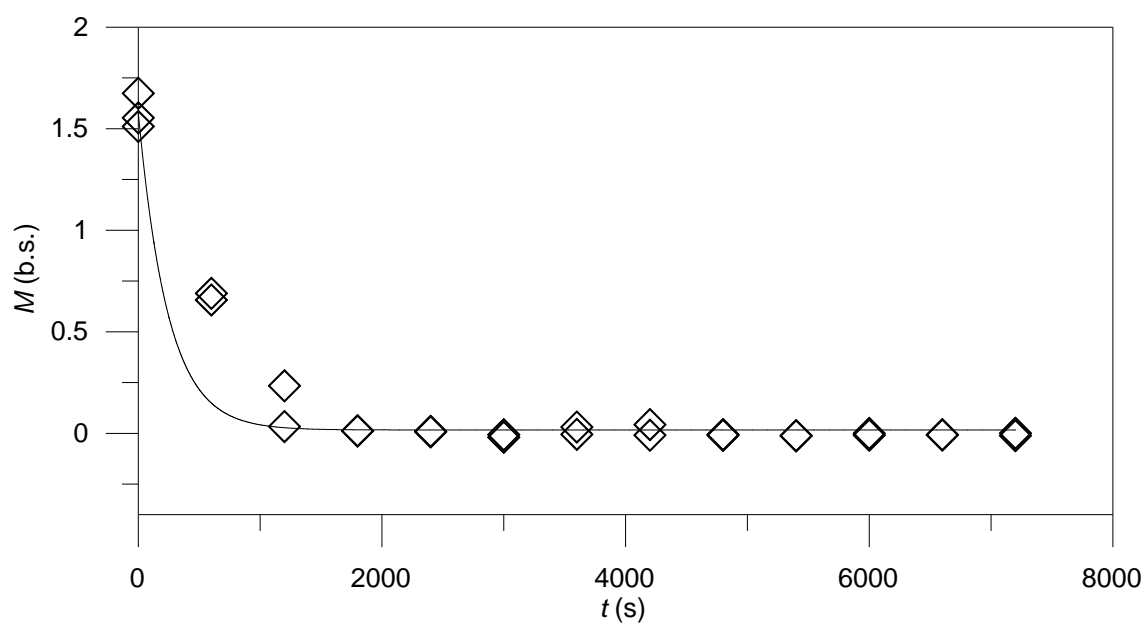


FIGURA 4.16. Comparação entre curvas experimentais (símbolos) e calculada (linha sólida) de secagem de erva-mate em secador batelada a 133,0 °C. Condição de operação: ensaio 5 da Tabela 3.2.

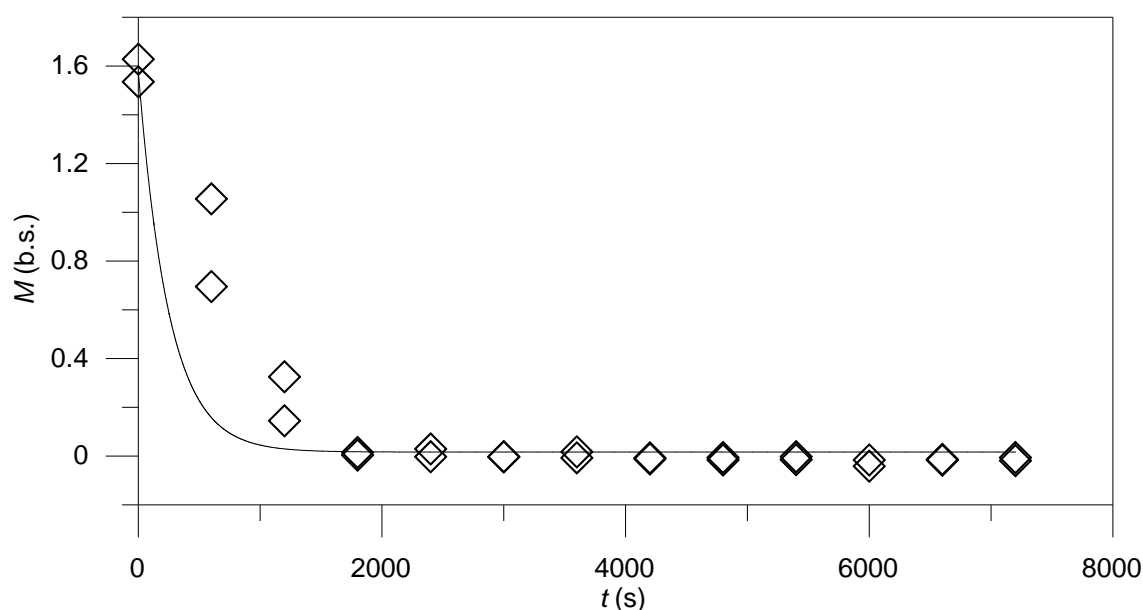


FIGURA 4.17. Comparação entre curvas experimentais (símbolos) e calculada (linha sólida) de secagem de erva-mate em secador batelada a 132,4 °C. Condição de operação: ensaio 6 da Tabela 3.2.

Devido aos gradientes longitudinais de temperatura do ar, os resultados de temperatura das folhas de erva-mate nas Figuras 4.18 a 4.23 são particularmente atípicos. Como antes comentado, o secador não é suficientemente longo para reduzir a influência da transferência de calor das extremidades do secador para o ambiente. Para o propósito prático de controle, este não é um bom resultado visto que reduz o efeito da umidade de entrada sobre a temperatura das folhas e torna difícil inferir a variável controlada com base em medidas de  $T_s$ . Uma análise de sensibilidade para a temperatura das folhas com relação a umidade de alimentação em um secador virtual não-isotérmico (caso presente) e isotérmico é reportada na literatura em condições análogas as investigadas neste trabalho (TUSSOLINI *et al.*, 2014). Os resultados evidenciam que a temperatura das folhas apresenta notável sensibilidade a umidade de alimentação quando o secador opera em condições isotérmicas, mas ela é reduzida drasticamente nas circunstâncias presentemente investigadas (secador não isotérmico).

Neste ponto é importante lembrar que determinar a umidade de sólidos *on-line* é um dos maiores desafios para controle automático de umidade em

secadores, cujas soluções práticas não são classicamente econômicas. Dentre os sensores de umidade mencionado na seção 2.5, alguns tipos, tais como sensor por espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) (STAWCZYK *et al.*, 2009) ou baseados em ultra rápida cromatografia gasosa (RAGHAVAN, WANG e GARIÉPY, 2010) tem sido utilizadas para monitorar e controlar processos de secagem. Entretanto, sensores *on-line* de umidade tem sido recentemente substituídos por medidas indiretas com medidores mais simples, econômicos e rápidos (AMAZOUZ e PANTEA, 2006). De fato, o uso de um termômetro de infravermelho para determinar  $T_s$  foi anteriormente sugerido na literatura como um procedimento válido para substituir as caras análises de umidade em uma estratégia de controle em secadores de esteira de erva-mate (JENSEN, MELEIRO e ZANOELO, 2011). Entretanto, a discussão precedente sugere que esta estratégia de controle por inferência não seria recomendada para o presente caso, isto é, em secadores não isotérmicos.

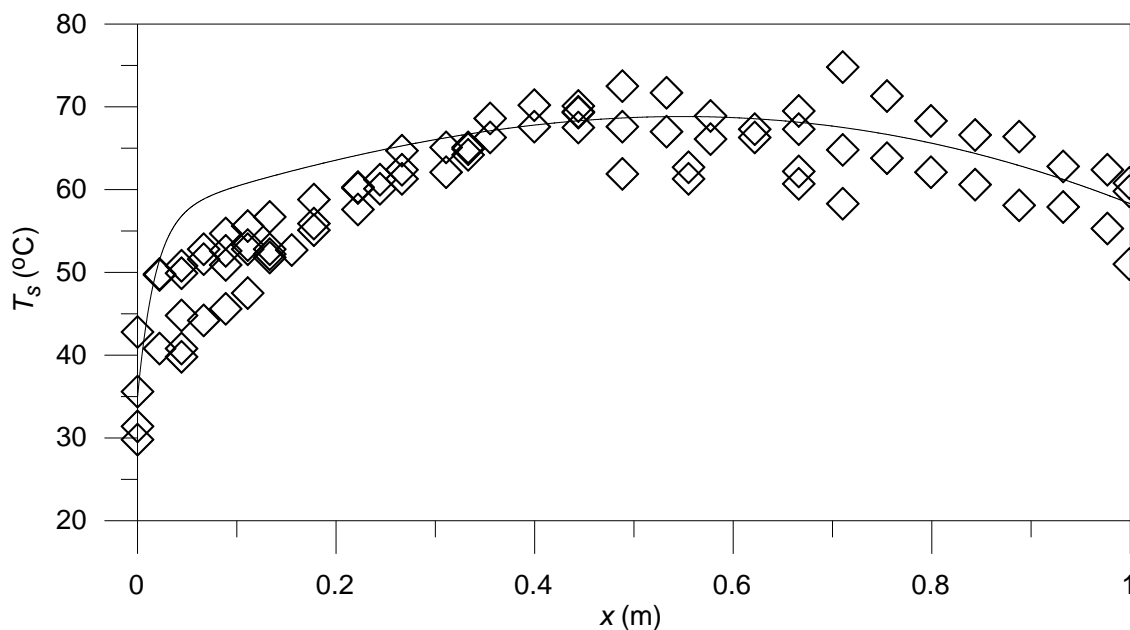


FIGURA 4.18. Temperaturas medidas (símbolos) e calculadas (linha sólida) das folhas ao longo do secador de esteira a 69,9 °C. Condição de operação: ensaio 7 da Tabela 3.2.



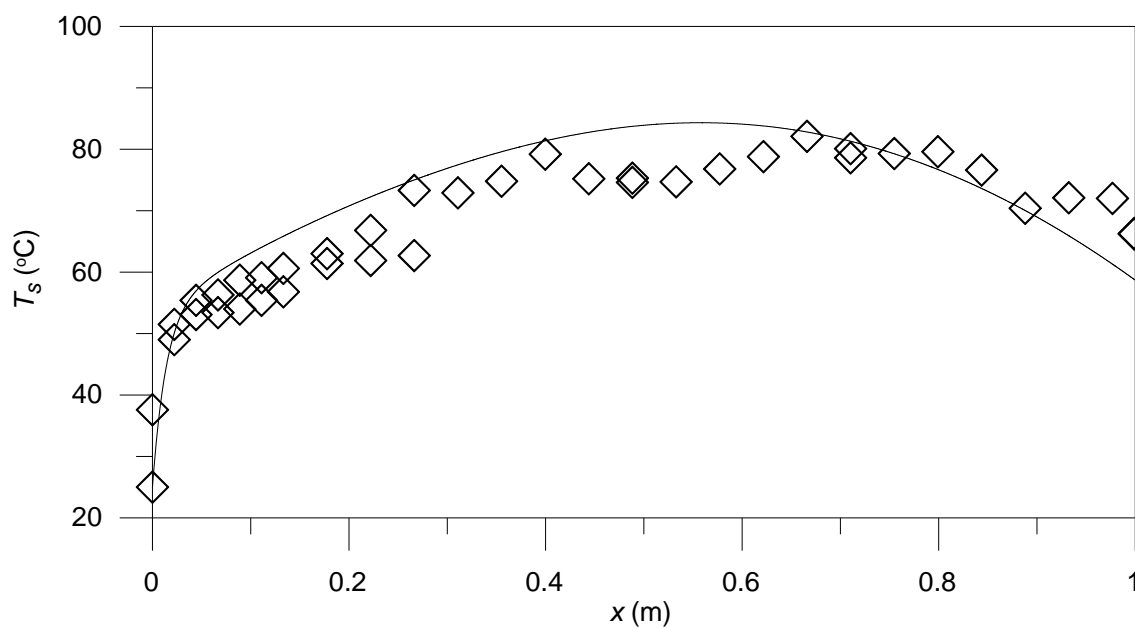


FIGURA 4.19. Temperaturas medidas (símbolos) e calculadas (linha sólida) das folhas ao longo do secador de esteira a 79,1 °C. Condição de operação: ensaio 8 da Tabela 3.2.

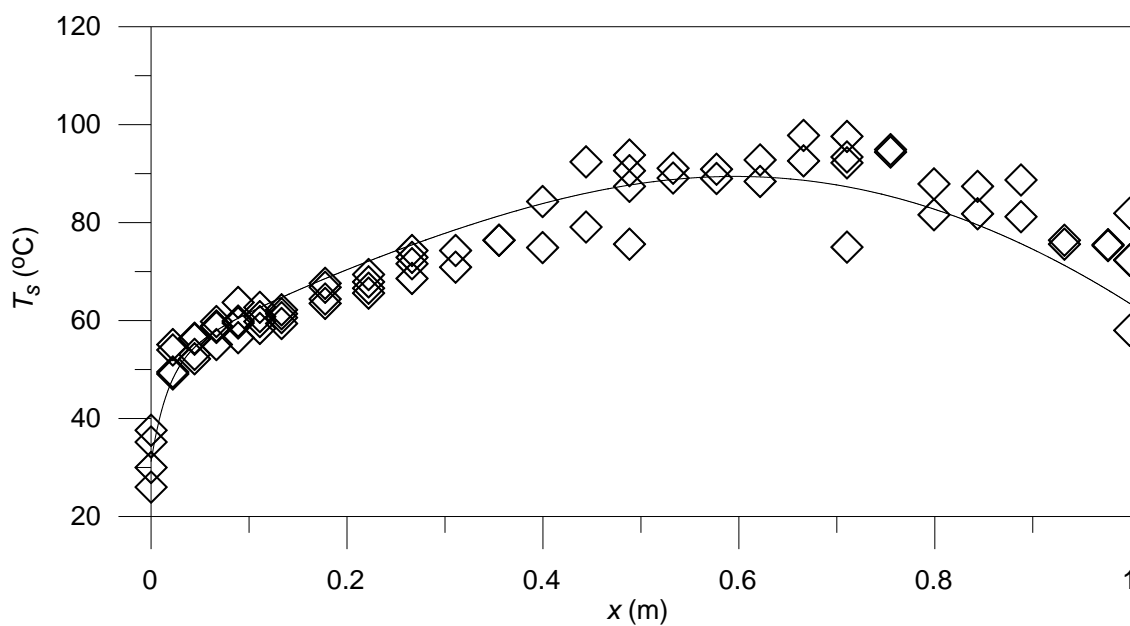


FIGURA 4.20. Temperaturas medidas (símbolos) e calculadas (linha sólida) das folhas ao longo do secador de esteira a 83,9 °C. Condição de operação: ensaio 9 da Tabela 3.2.

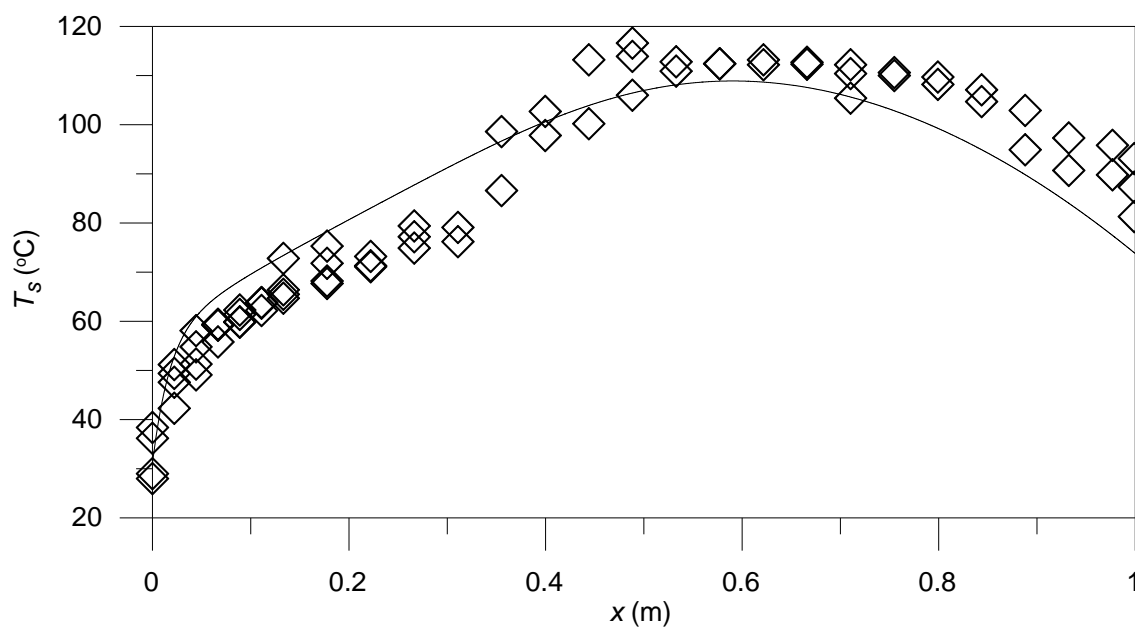


FIGURA 4.21. Temperaturas medidas (símbolos) e calculadas (linha sólida) das folhas ao longo do secador de esteira a 98,9 °C. Condição de operação: ensaio 10 da Tabela 3.2.

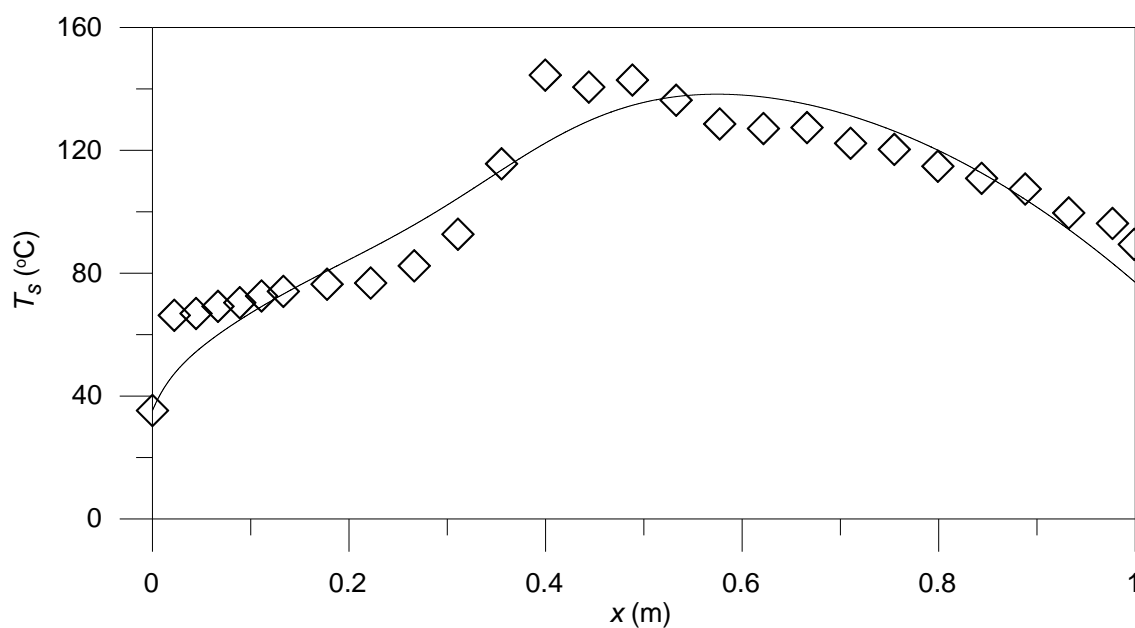


FIGURA 4.22. Temperaturas medidas (símbolos) e calculadas (linha sólida) das folhas ao longo do secador de esteira a 114,3 °C. Condição de operação: ensaio 11 da Tabela 3.2.

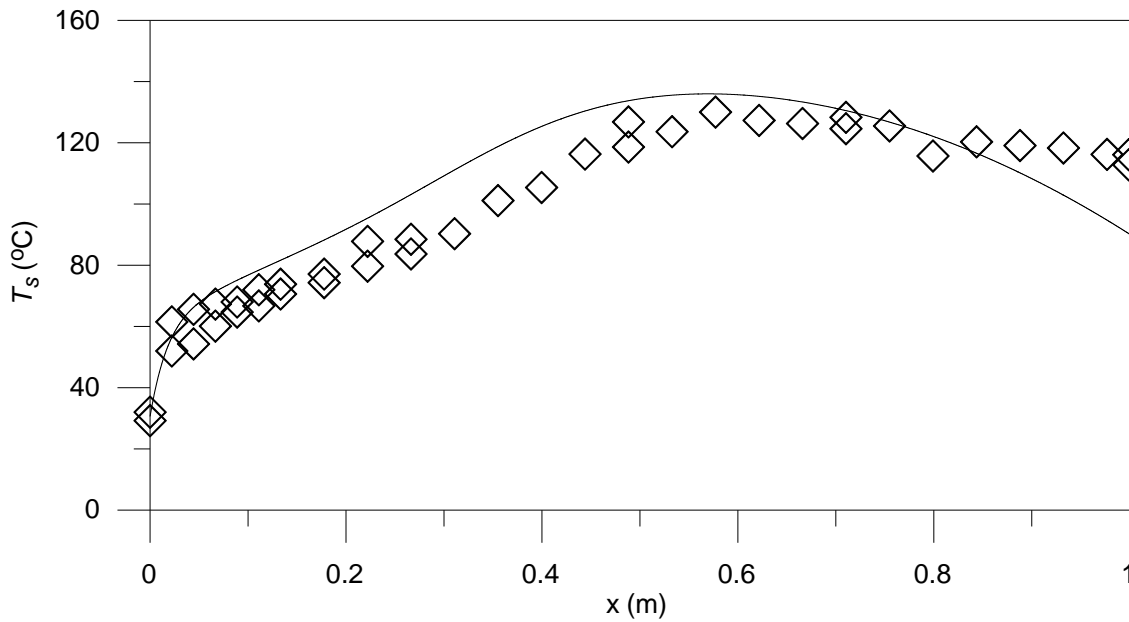


FIGURA 4.23. Temperaturas medidas (símbolos) e calculadas (linha sólida) das folhas ao longo do secador de esteira a 118,6 °C. Condição de operação: ensaio 12 da Tabela 3.2.

Uma estratégia por realimentação para controle de umidade de folhas de erva-mate na descarga do presente secador de esteira de camada delgada foi experimentalmente examinada. Em particular, um amplo conjunto de experimentos em malha fechada foi conduzido nas condições de operação definidas na Tabela 3.3. Em todos os casos, a secagem começa com um leito fino de folhas, homogêneo em termos de umidade e temperatura, distribuído ao longo do comprimento total da esteira localizada no interior da câmara de secagem. Em um instante  $t > 0$ , um *set-point* foi imposto para a umidade na descarga do secador, o qual foi continuamente alimentado com folhas úmidas de erva em condições idênticas as iniciais, isto é,  $M_{in}=M_i$  e  $T_{sin}=T_{si}$ . Visto que a umidade desejada na saída era sempre menor do que a inicial (ou de alimentação, a velocidade da esteira foi ajustada entre  $3,7 \times 10^{-4}$  e  $15,2 \times 10^{-4}$  m s<sup>-1</sup> para manter a secagem sobre controle. Esta mudança de velocidade ocorreu manualmente por 7200 s em intervalos de 120 s. As velocidades usadas foram preliminarmente calculadas com a Equação (4.2) (para um controlador do tipo PID) através de simulações em malha fechada com o

secador virtual (Equações 3.3 e 3.4) operado em condições idênticas as experimentalmente adotadas.

$$u_c = K_p \left[ \varepsilon(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + \tau_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right] \quad (4.2)$$

As Figuras 4.24, 4.26, 4.28, 4.30, 4.32, 4.34, 4.36 e 4.38 reportam as velocidades adotadas na esteira para ter respostas de umidade na descarga em malha fechada demonstradas nas Figuras 4.25, 4.27, 4.29, 4.31, 4.33, 4.35, 4.37 e 4.39, respectivamente. Em todos os casos, as curvas experimentais de umidade apresentaram a clássica forma de curvas de decaimento exponencial com desvios reduzidos em relação ao modelo de secagem (desvio médio < 11 %). Na realidade, este comportamento era esperado visto que o conjunto de parâmetros do controlador PID e as velocidades aplicadas na esteira foram baseadas no modelo transiente de secagem de folhas. De qualquer forma, o mais importante resultado nas Figuras 4.24 a 4.39 é que a umidade das folhas na saída do secador foi sempre levada ao valor desejado em um período curto de secagem, e mantida neste valor por todo o ensaio. Esta evidência confirma a validade do esquema de controle sugerido. Um aspecto marcante nos diagramas de  $M_o$  em função de  $t$  é que o controle é eficiente apesar do amplo intervalo de variação de umidade na alimentação ( $\approx 0,5$ - $1,7$  base seca) e de temperatura média de secagem ( $\approx 70$ - $97$  oC).

Diferentes conjuntos de parâmetros do controlador foram requeridos para controlar o processo quando o set-point foi variado de aproximadamente 0,1 a 1,0 em base seca (ver Tabela 3.3). Embora estas mudanças na variável manipulada não tenham sido dinamicamente calculadas, este fato não deve ter impacto na performance de um sistema que envolve mudanças dinâmicas do set-point (situação real). Supõe-se que isto deva ocorrer devido ao reduzido tempo requerido para executar a rotina de otimização, implementada juntamente com o modelo de cálculo em uma rotina computacional, para ter o ótimo conjunto transiente de parâmetros do controlador PID e de velocidade da esteira.

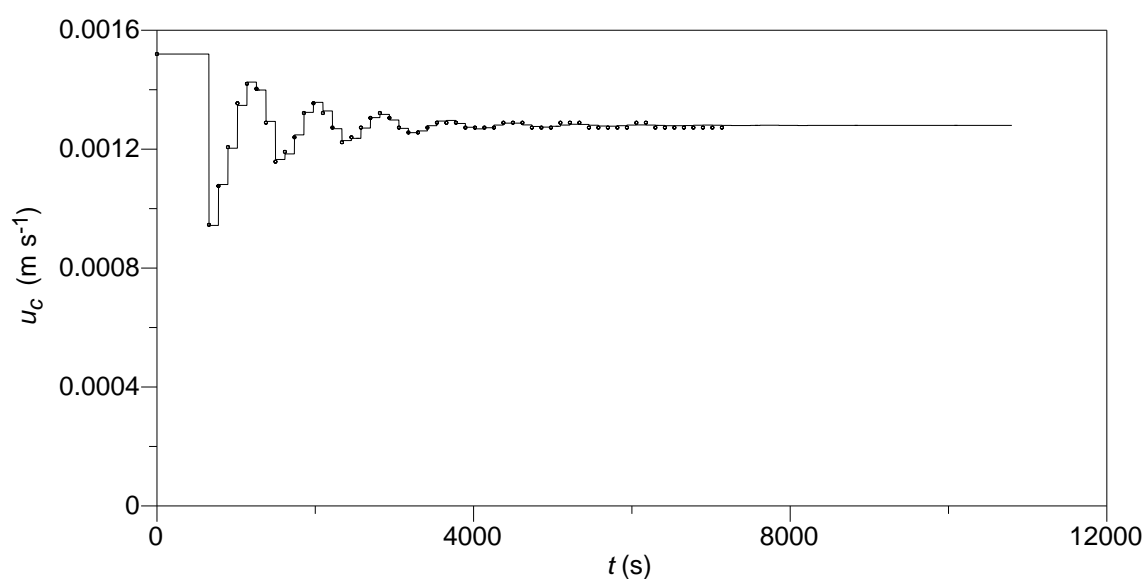


FIGURA 4.24. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 1,43 para 1,0 (b.s.) (ver Figura 4.25). Condição de operação: ensaio 1 da Tabela 3.3.

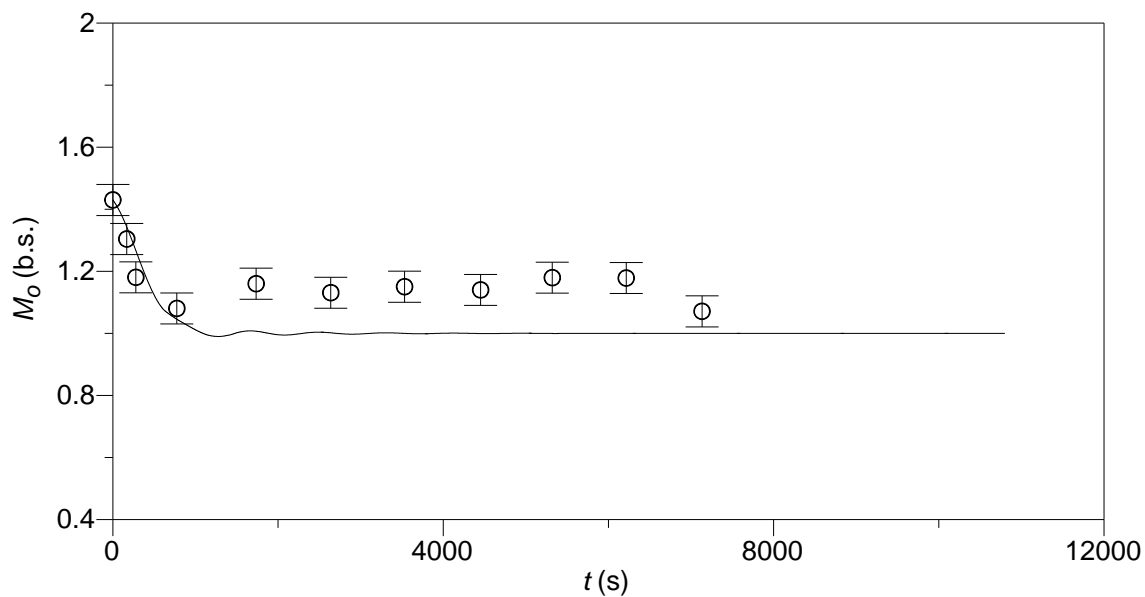


FIGURA 4.25. Umidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 1,43 para 1,0 (b.s.). Condição de operação: idêntica à reportada na Figura 4.24.

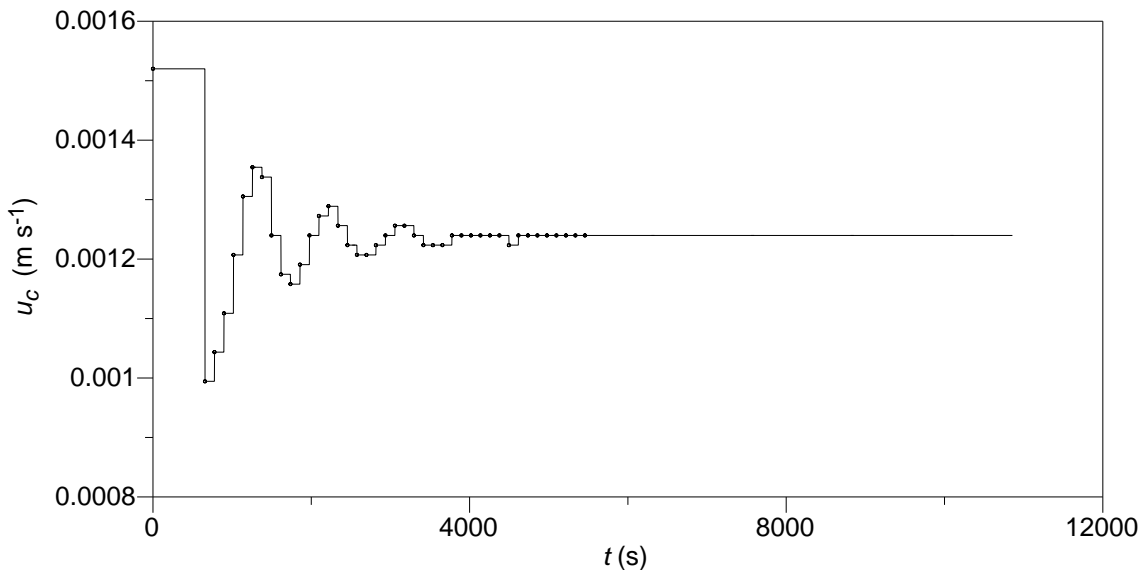


FIGURA 4.26. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 1,14 para 0,7 (b.s.) (ver Figura 4.27). Condição de operação: ensaio 2 da Tabela 3.3.

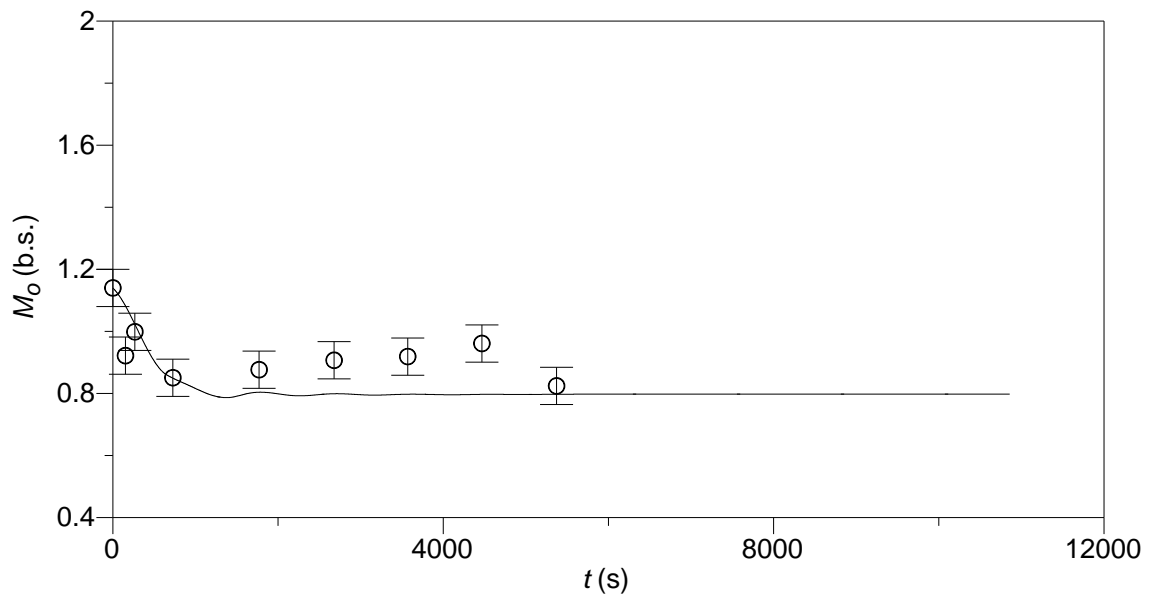


FIGURA 4.27. Umidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 1,14 para 0,7 (b.s.). Condição de operação: idêntica à reportada na Figura 4.26.

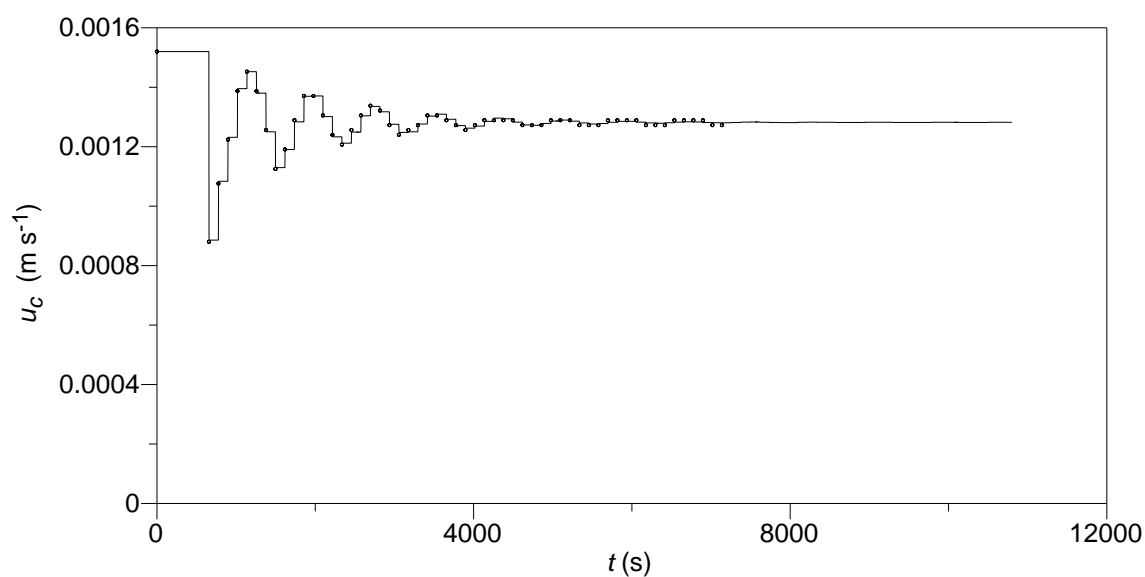


FIGURA 4.28. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 1,42 para 0,9 (b.s.) (ver Figura 4.29). Condição de operação: ensaio 3 da Tabela 3.3.

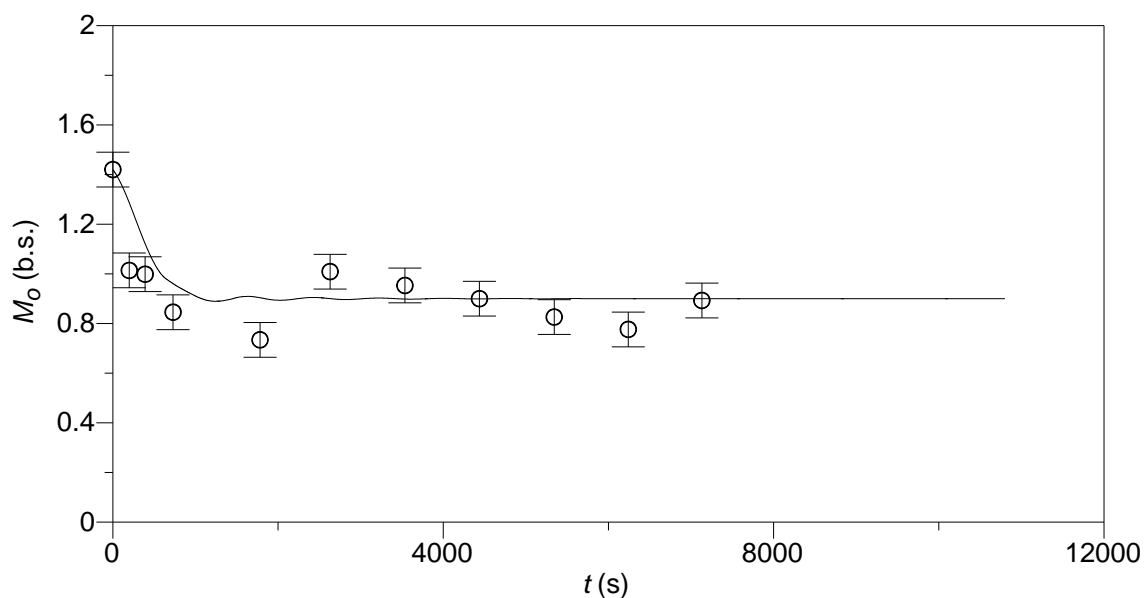


FIGURA 4.29. Umidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 1,42 para 0,9 (b.s.). Condição de operação: idêntica à reportada na Figura 4.28.

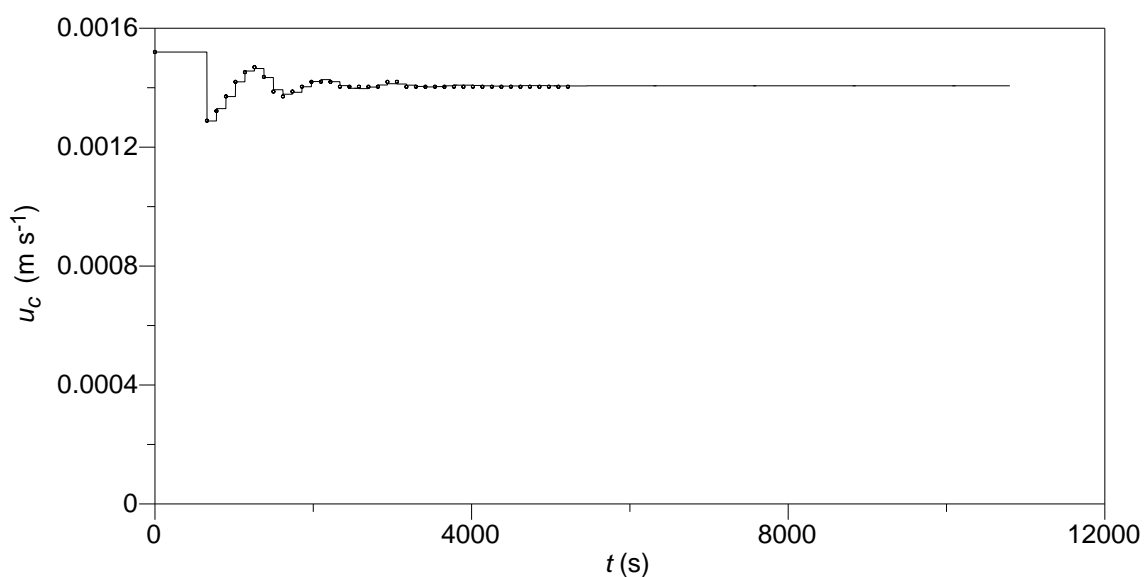


FIGURA 4.30. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 0,9 para 0,6 (b.s.) (ver Figura 4.31). Condição de operação: ensaio 4 da Tabela 3.3.

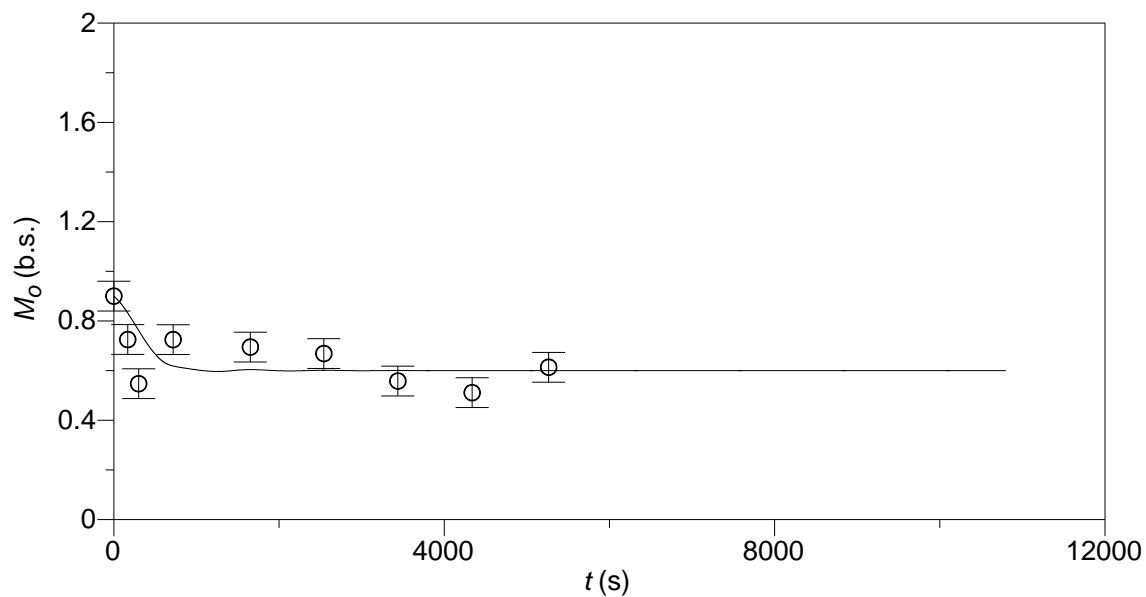


FIGURA 4.31. Umidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 0,9 para 0,6 (b.s.). Condição de operação: idêntica à reportada na Figura 4.30.



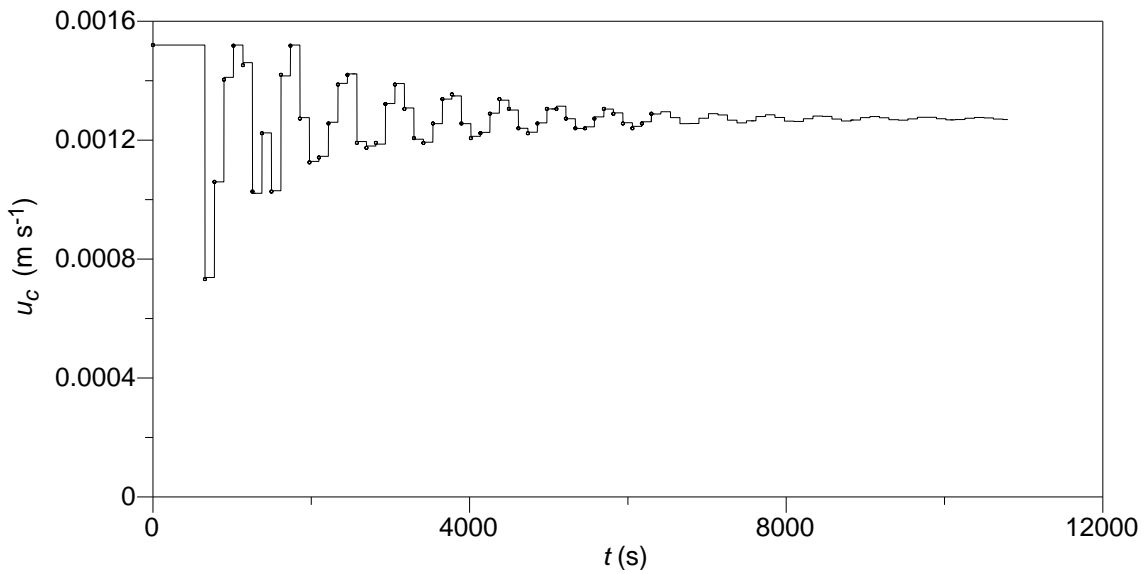


FIGURA 4.32. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 1,71 para 0,9 (b.s.) (ver Figura 4.33). Condição de operação: ensaio 5 da Tabela 3.3.

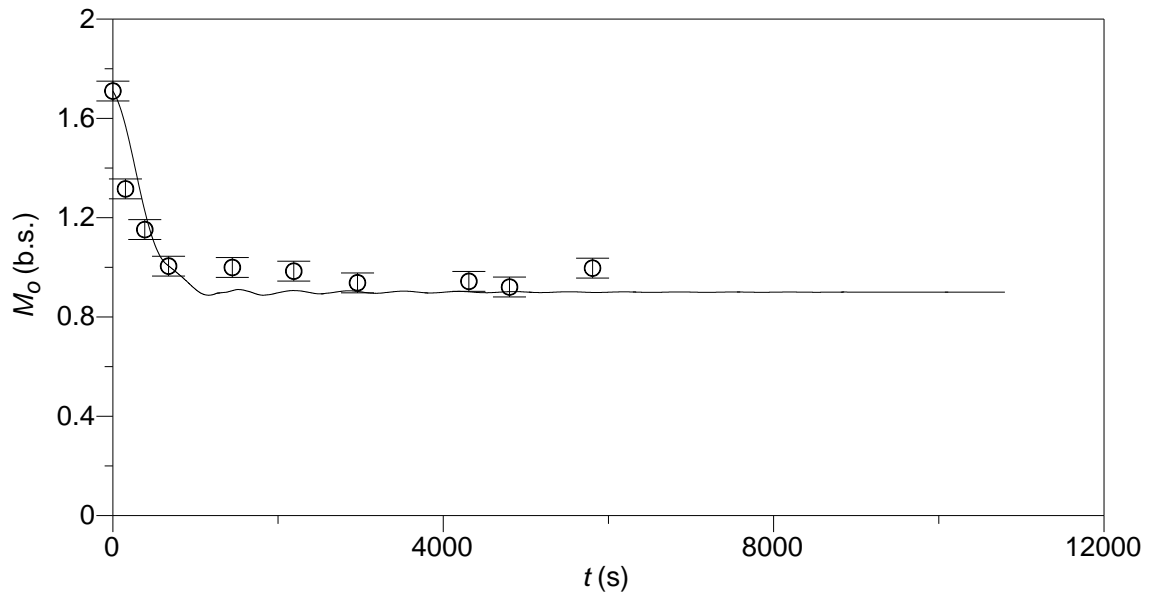


FIGURA 4.33. Umidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 1,71 para 0,9 (b.s.). Condição de operação: idêntica à reportada na Figura 4.32.

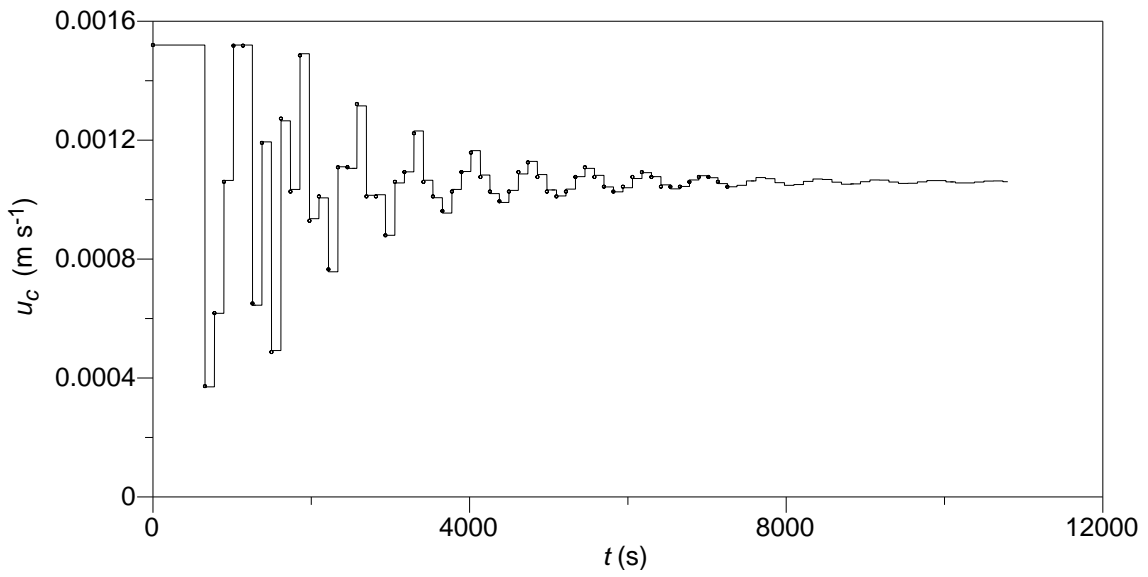


FIGURA 4.34. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 1,09 para 0,6 (b.s.) (ver Figura 4.35). Condição de operação: ensaio 6 da Tabela 3.3.

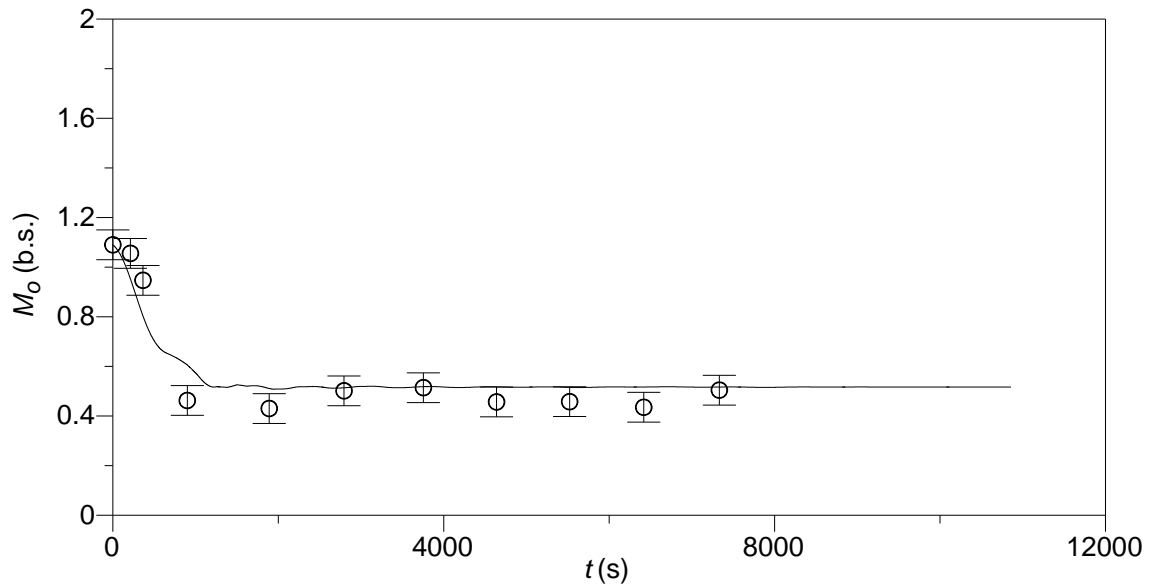


FIGURA 4.35. Unidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 1,09 para 0,6 (b.s.). Condição de operação: idêntica à reportada na Figura 4.34.

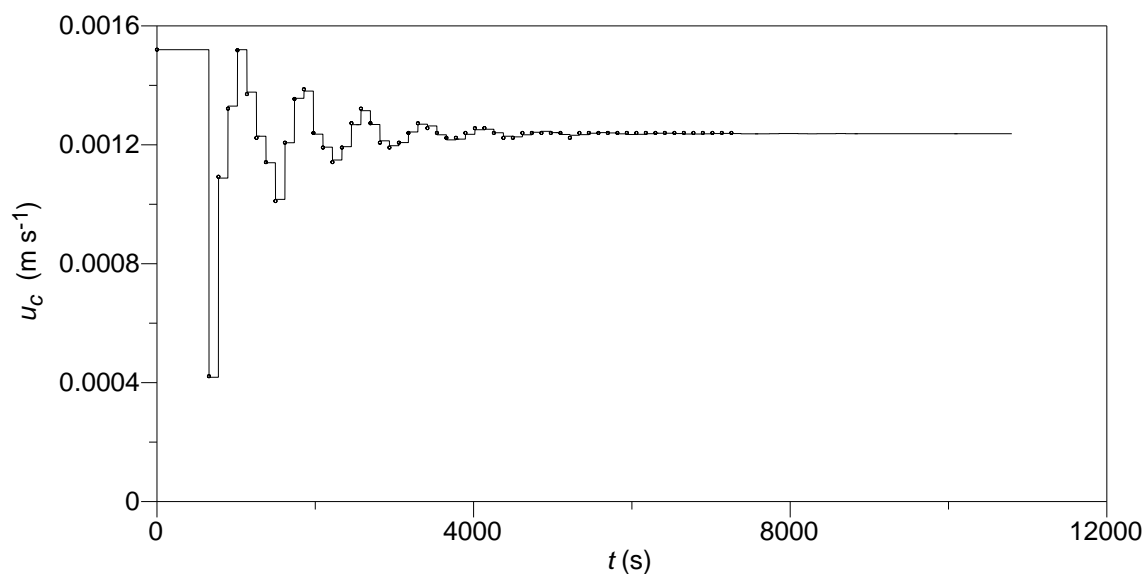


FIGURA 4.36. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 1,21 para 0,6 (b.s.) (ver Figura 4.37). Condição de operação: ensaio 7 da Tabela 3.3.

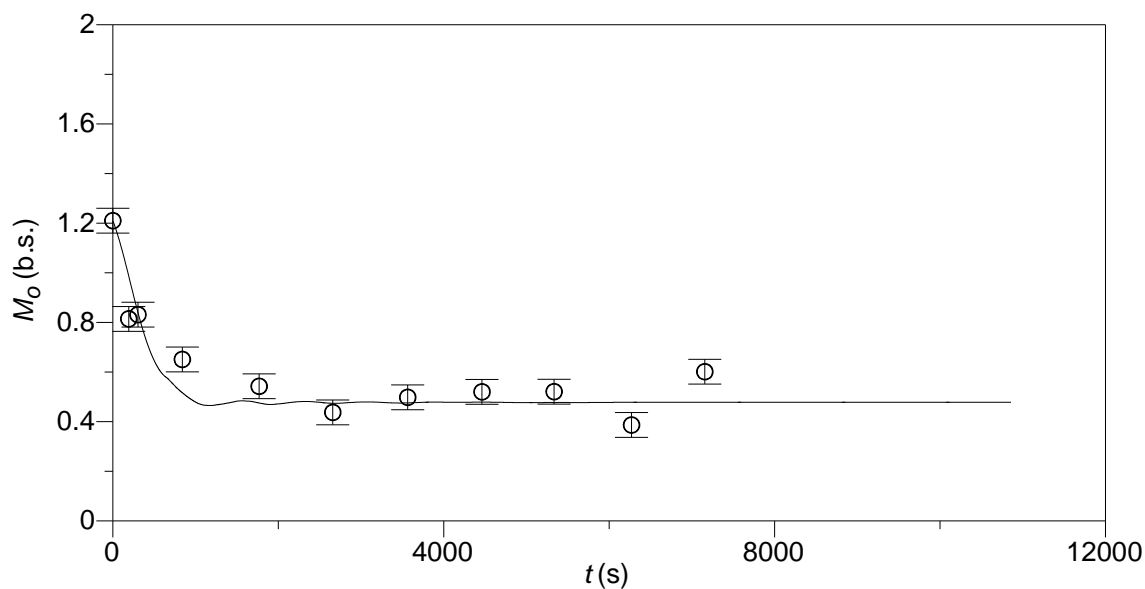


FIGURA 4.37. Umidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 1,21 para 0,6 (b.s.). Condição de operação: idêntica à reportada na Figura 4.36.

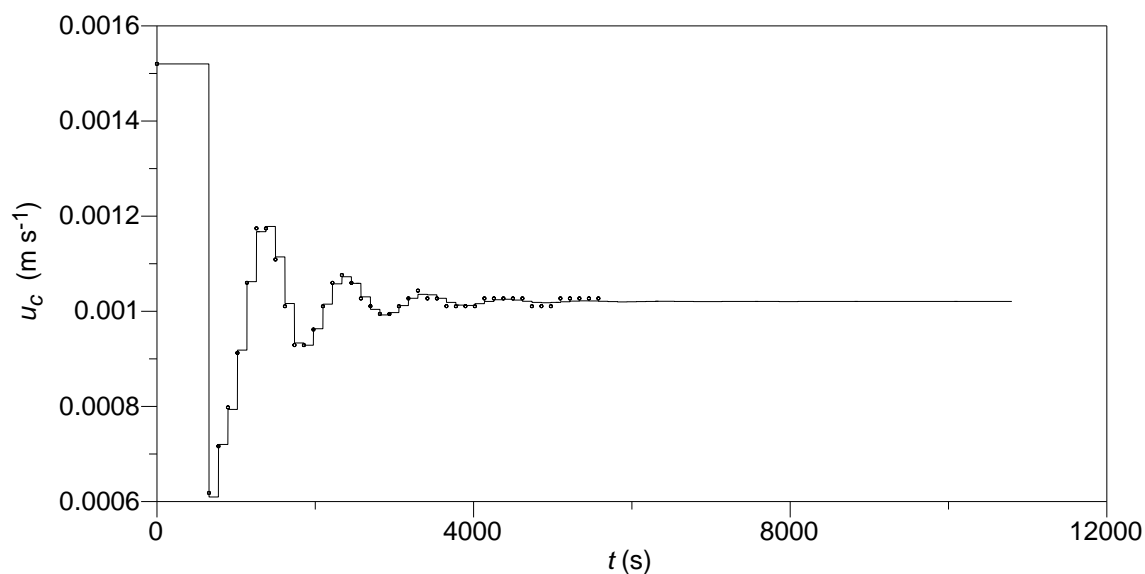


FIGURA 4.38. Velocidades estimadas (linha sólida) e utilizadas nos experimentos em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 0,48 para 0,2 (b.s.) (ver Figura 4.39). Condição de operação: ensaio 8 da Tabela 3.3.

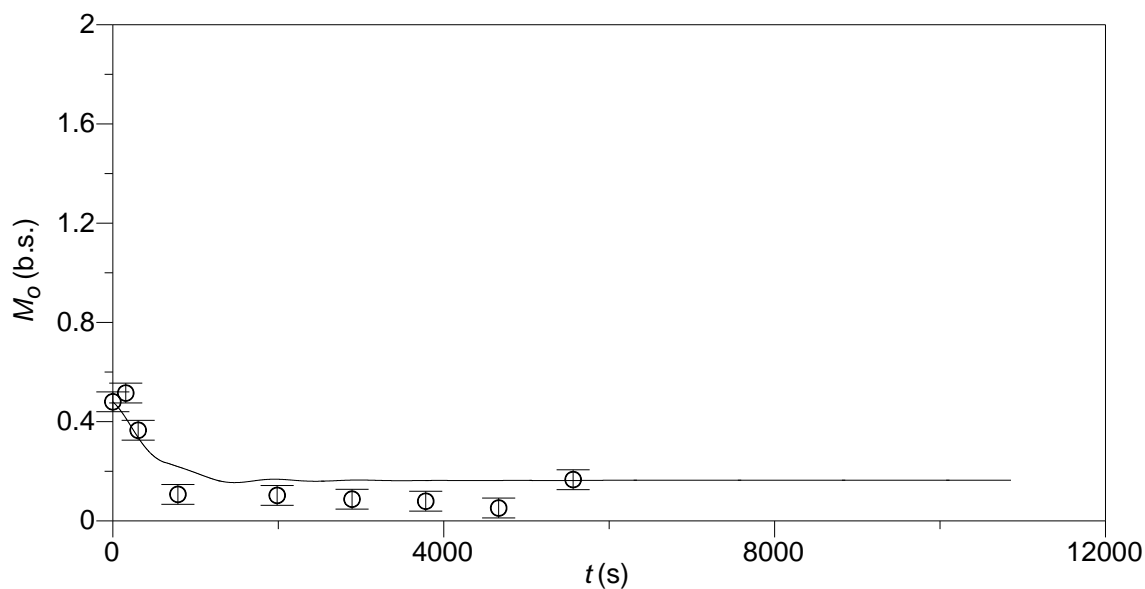


FIGURA 4.39. Umidades estimadas (linha sólida) e determinadas experimentalmente em malha fechada (símbolos) frente a uma perturbação no *set-point* de 0,48 para 0,2 (b.s.). Condição de operação: idêntica a reportada na Figura 4.38.

#### 4.2. Ramos de Erva-Mate

As Figuras 4.40 a 4.48 reportam resultados de temperatura dos ramos de diferentes diâmetros submetidos a três diferentes temperaturas de secagem. Em todos os casos a temperatura aumenta de forma aproximadamente linear em um intervalo inicial de aquecimento, mas a medida que o tempo tende ao infinito um período de queda de velocidade de aquecimento é observado e a temperatura do sólido se aproxima da temperatura média da fase gás. Os resultados experimentais obtidos em diferentes temperaturas envolvendo ramos com mesmo diâmetro evidenciam que patamares diferentes de temperatura são atingidos quando o tempo se aproxima do tempo final de secagem.

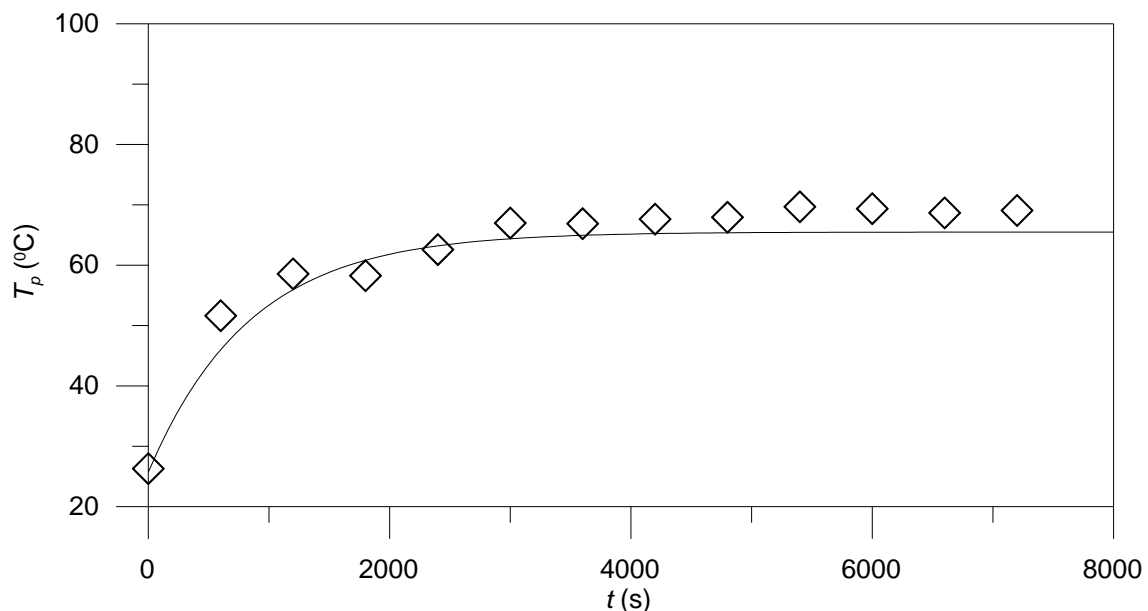


FIGURA 4.40. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a  $3,5 \times 10^{-3}$  m durante a secagem a  $T_{gm}=65,5$  °C. Condições de operação: ensaio 1 da Tabela 3.4.

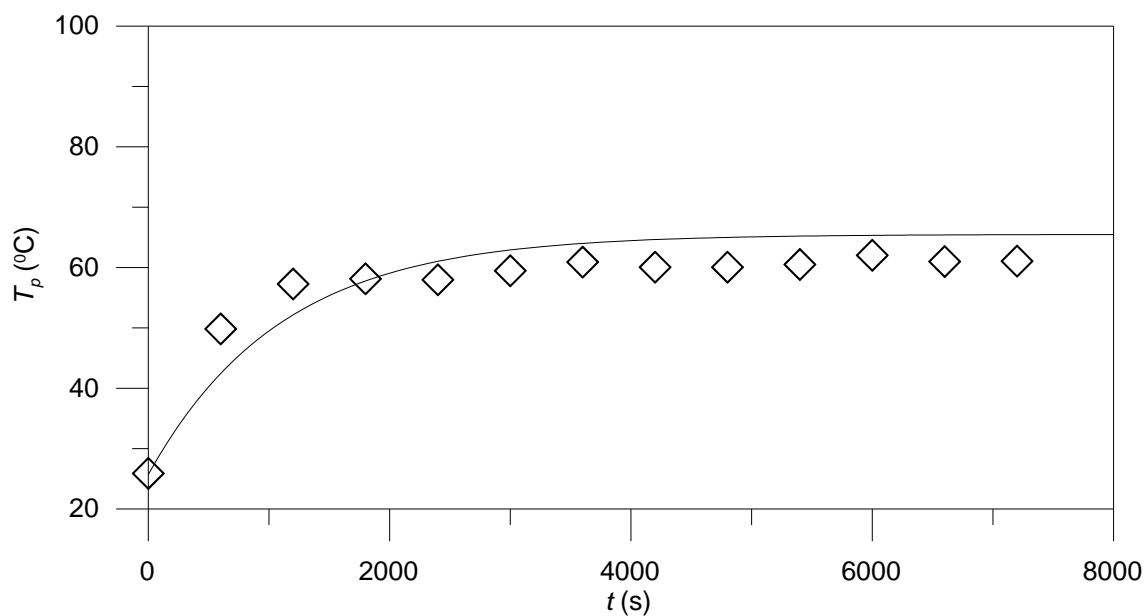


FIGURA 4.41. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a  $6,5 \times 10^{-3}$  m durante a secagem a  $T_{gm}=65,5$  °C. Condições de operação: ensaio 2 da Tabela 3.4.

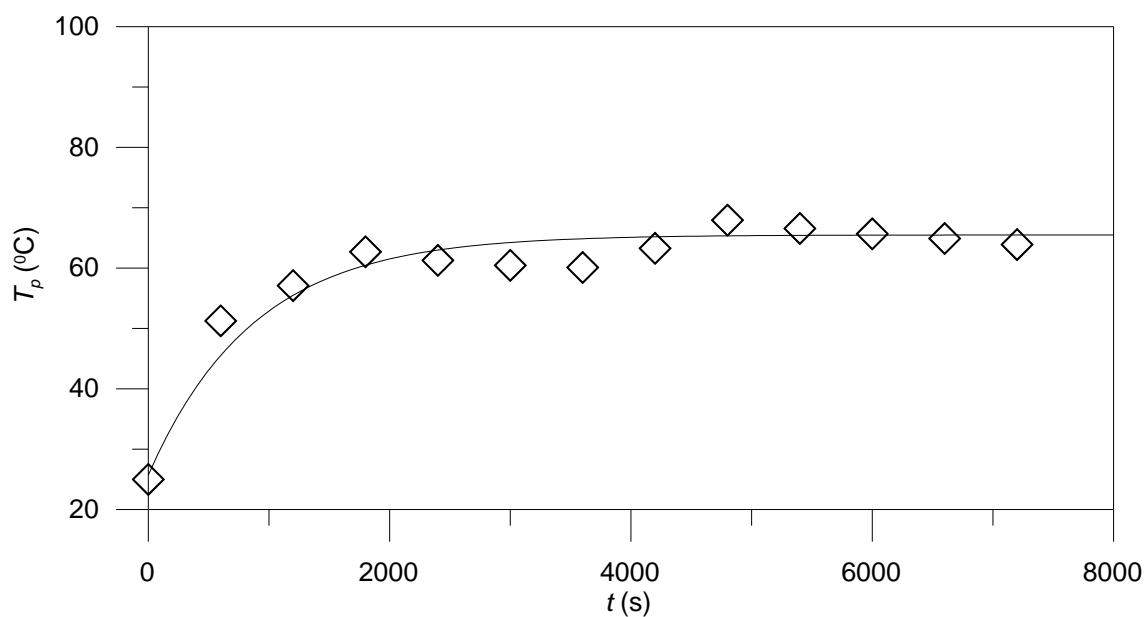


FIGURA 4.42. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a  $10 \times 10^{-3}$  m durante a secagem a  $T_{gm}=65,5$  °C. Condições de operação: ensaio 3 da Tabela 3.4.

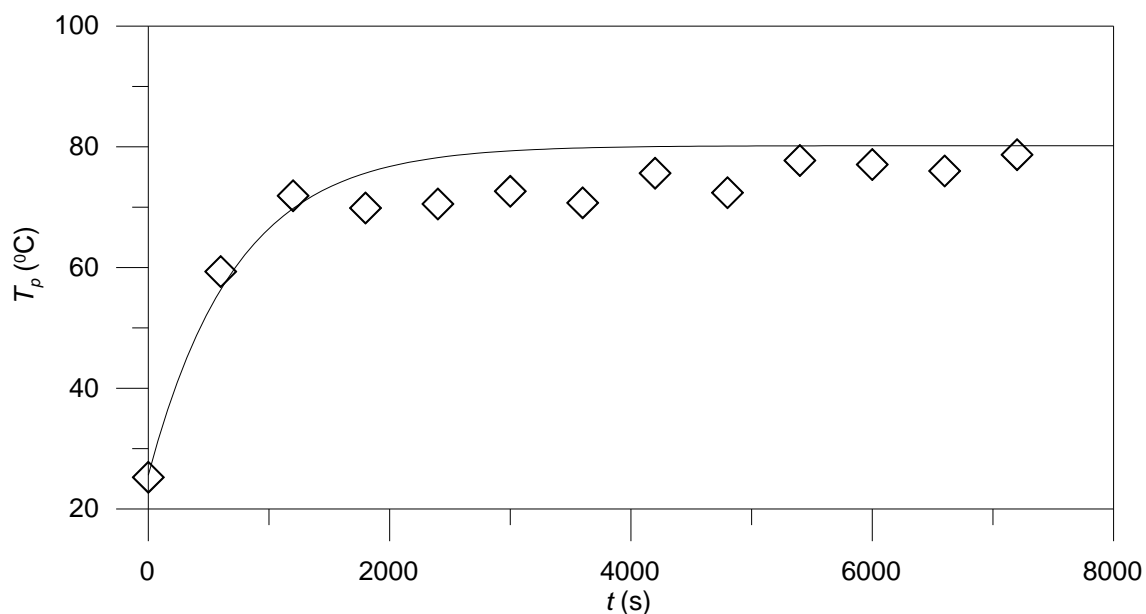


FIGURA 4.43. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a  $3,5 \times 10^{-3}$  m durante a secagem a  $T_{gm}=80,2$  °C. Condições de operação: ensaio 4 da Tabela 3.4.

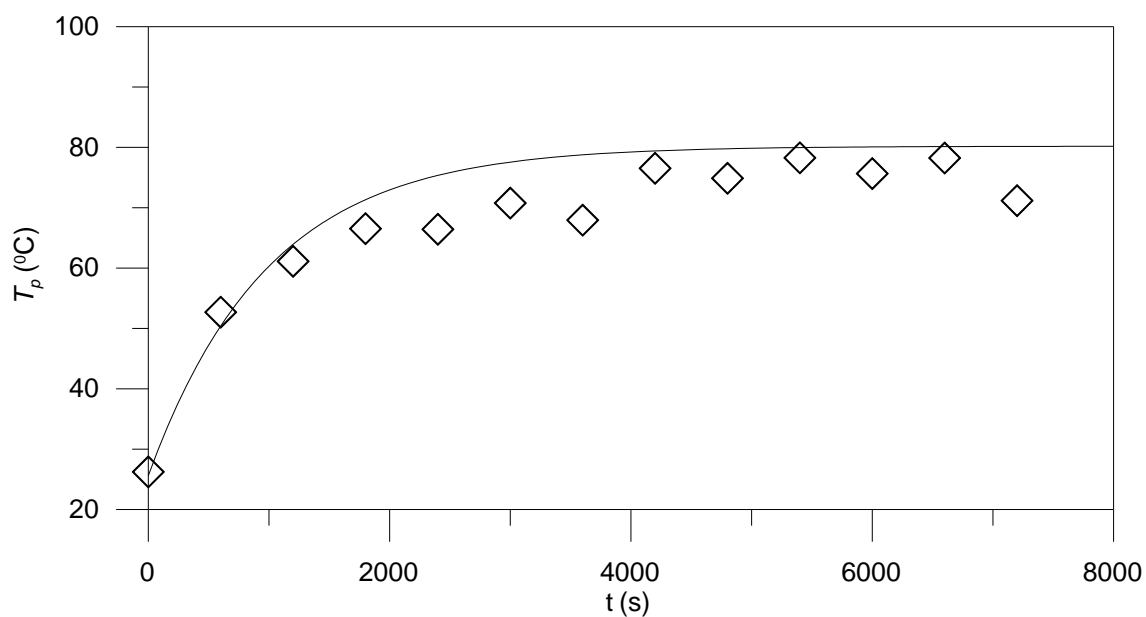


FIGURA 4.44. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a  $6,5 \times 10^{-3}$  m durante a secagem a  $T_{gm}=80,2$  °C. Condições de operação: ensaio 5 da Tabela 3.4.

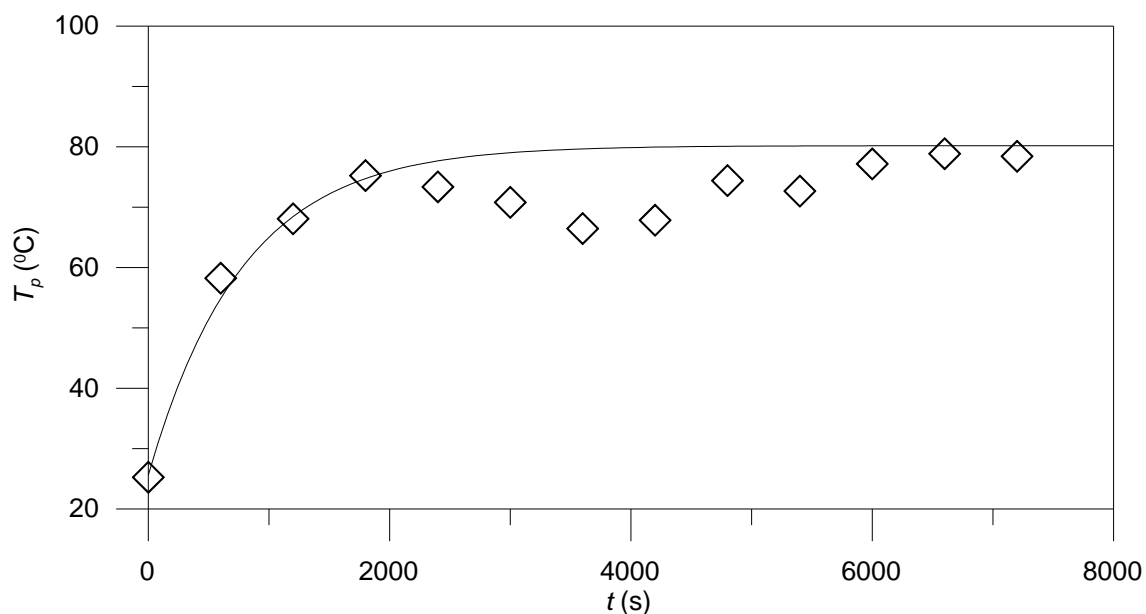


FIGURA 4.45. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a  $10 \times 10^{-3}$  m durante a secagem a  $T_{gm}=80,2$  °C. Condições de operação: ensaio 6 da Tabela 3.4.

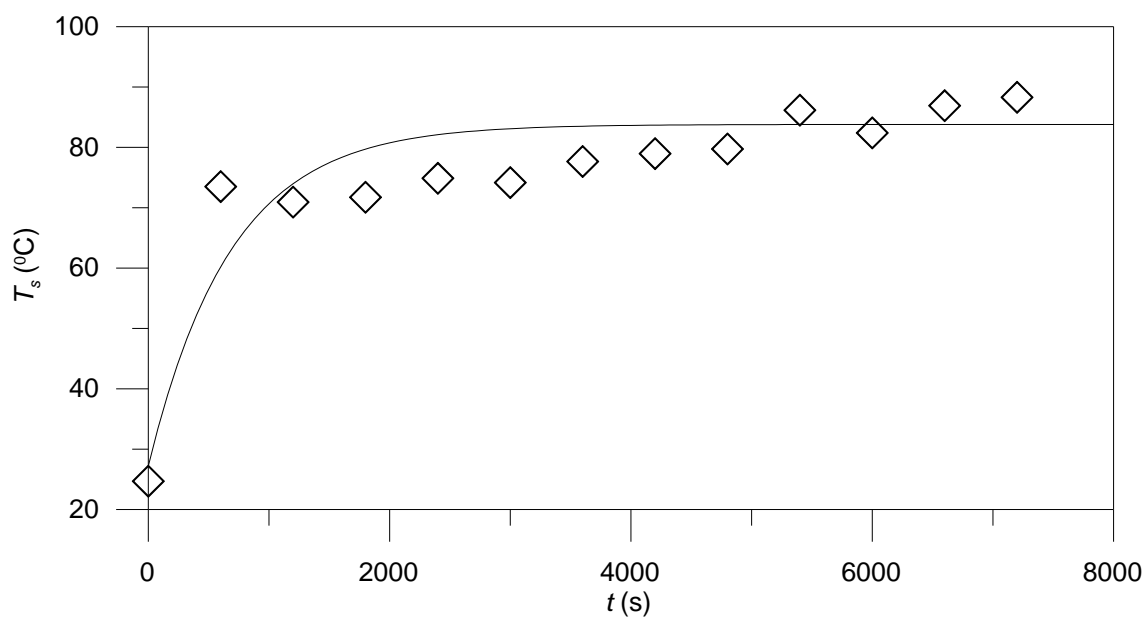


FIGURA 4.46. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a  $3,5 \times 10^{-3}$  m durante a secagem a  $T_{gm}=83,8$  °C. Condições de operação: ensaio 7 da Tabela 3.4.



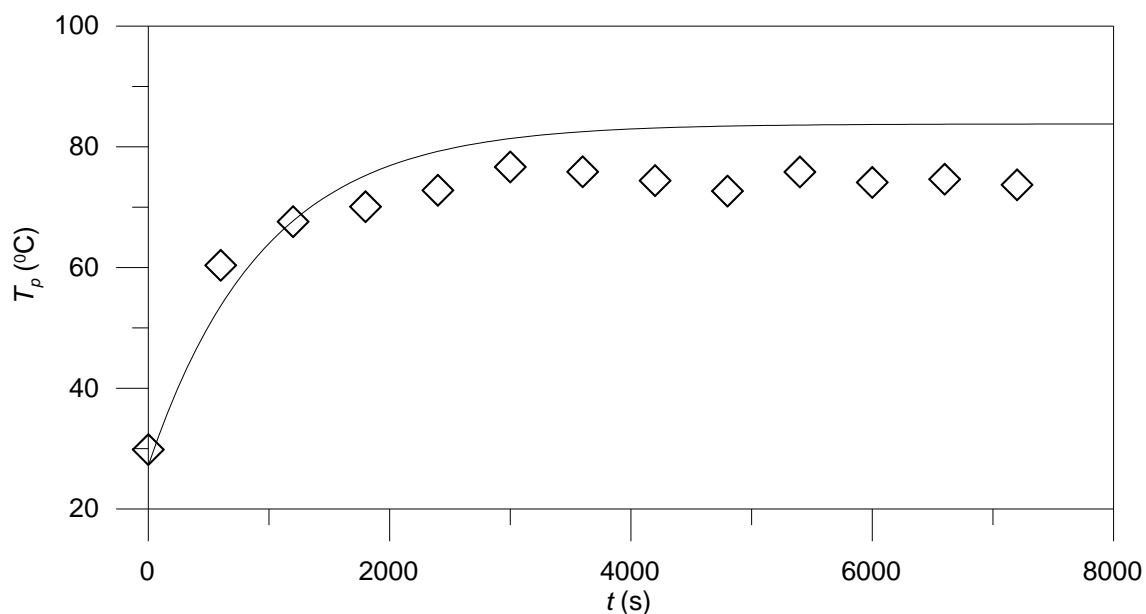


FIGURA 4.47. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a  $6,5 \times 10^{-3}$  m durante a secagem a  $T_{gm}=83,8$  °C. Condições de operação: ensaio 8 da Tabela 3.4.

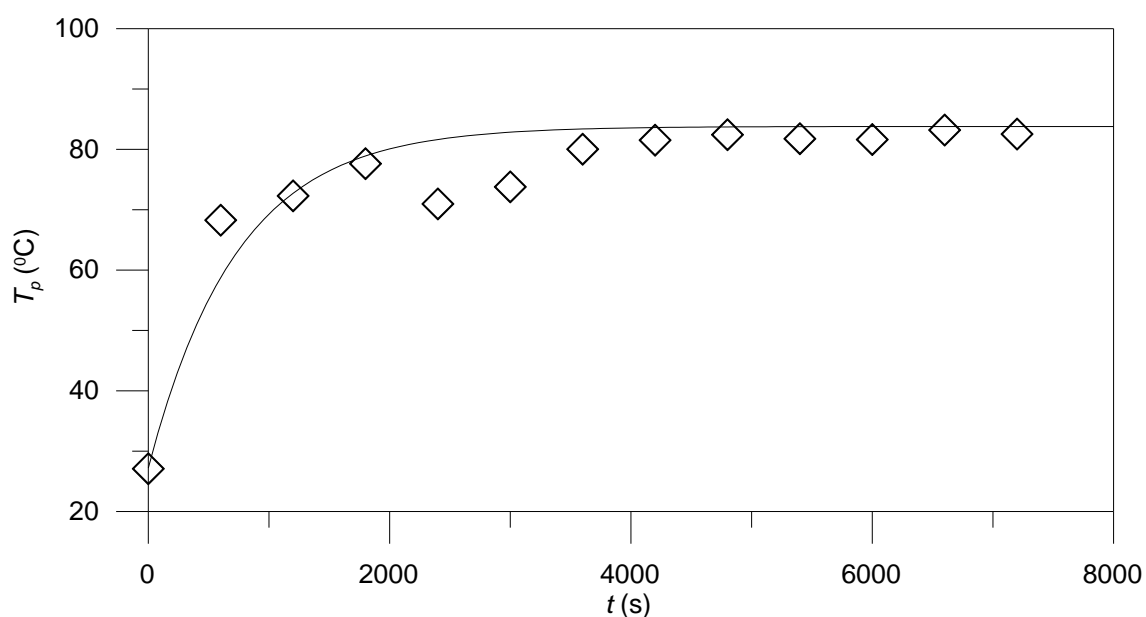


FIGURA 4.48. Temperatura experimental (símbolos) e calculada (linha) dos ramos com diâmetro igual a  $10 \times 10^{-3}$  m durante a secagem a  $T_{gm}=83,8$  °C. Condições de operação: ensaio 9 da Tabela 3.4.

Comparações entre resultados obtidos em uma mesma temperatura de secagem demonstram que o efeito do diâmetro sobre a temperatura é

desprezível (ex.; ver Figura 4.49 para  $T_{gm}=80,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), o que corrobora que o fenômeno é controlado pela convecção. De fato, nota-se que em todas as condições investigadas o modelo convectivo representado pela Equação (3.9) reproduz corretamente os resultados experimentais.

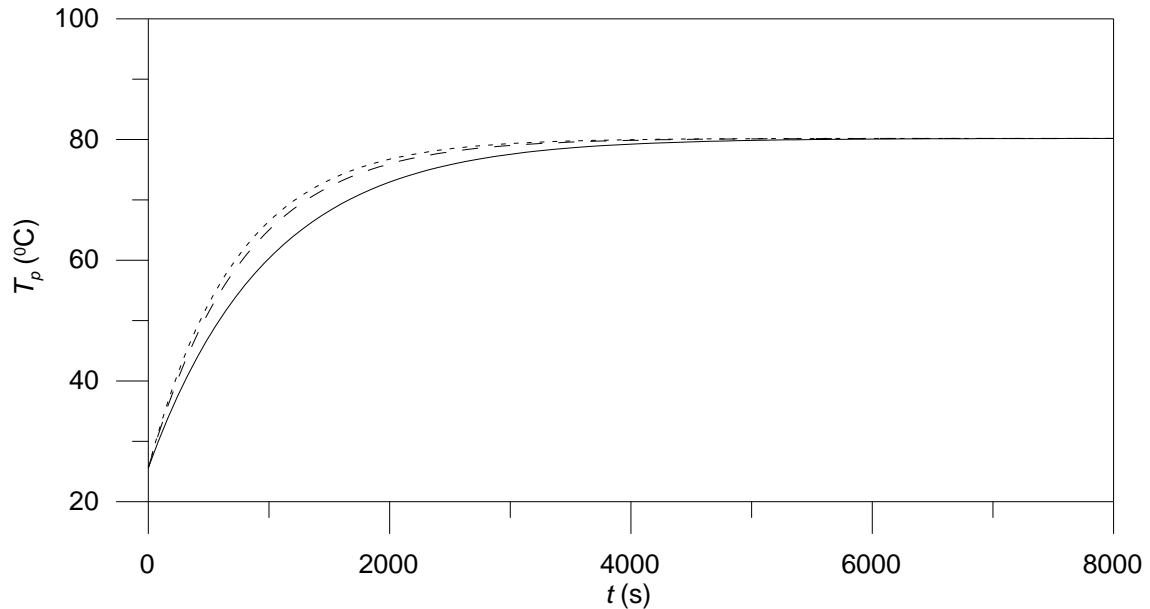


FIGURA 4.49. Comparação entre valores calculados de temperatura dos ramos para  $D=3,5 \times 10^{-3}$  m (linha com traços curtos),  $D=6,5 \times 10^{-3}$  m (linha sólida) e  $D=10 \times 10^{-3}$  m (linha com traços longos) a  $T_{gm}=80,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Como já comentado na seção 3.6, o modelo em questão envolve um único parâmetro ajustável (coeficiente convectivo  $h$  da Equação 3.10), o qual foi encontrado para cada par ordenado de diâmetro dos ramos e temperatura do ar de acordo com metodologia descrita na referida seção. Os nove valores de  $h$  foram utilizados para gerar uma expressão empírica em termos de números adimensionais para cálculo desta variável (Equação 4.3). Os parâmetros desta correlação foram obtidos com o método de Levenberg-Marquardt. O cálculo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) revela que a Equação (4.3) explica aproximadamente 95 % da variação do número de Nusselt devido a variações no número de Reynolds.

$$Nu = 0,135 \exp(0,0833 Re) \quad (4.3)$$

Deve-se ressaltar que embora uma expressão para  $h$  análoga a Equação (4.3) (Equação 3.12 reportada por BENNETT e MYERS, 1978), tenha sido empregada para cálculo do número de Biot definido na Equação (3.11), os resultados calculados de temperatura dos ramos de erva-mate foram gerados a partir de coeficientes de transporte de calor estimados pela Equação (4.3).

A Figura 4.50 reporta uma comparação entre os valores de  $Nu$  estimados com a Equação (4.3) e a Equação (3.12) convecção normal a cilindro (BENNETT e MYERS, 1978). Observa-se que os coeficientes convectivos estimados nesta investigação são da mesma ordem de grandeza dos resultados reportados na literatura em condições análogas de transferência de calor. Este é um aspecto importante da investigação, pois foi a partir coeficientes convectivos encontrados com a Equação (3.12) que se assumiu a premissa de que a condução de calor interna aos cilindros poderia ser desprezada. Em resumo, a Figura 4.49 corrobora a hipótese, adotada no procedimento de modelagem, de que a convecção governa a transferência de calor durante o aquecimento dos ramos.

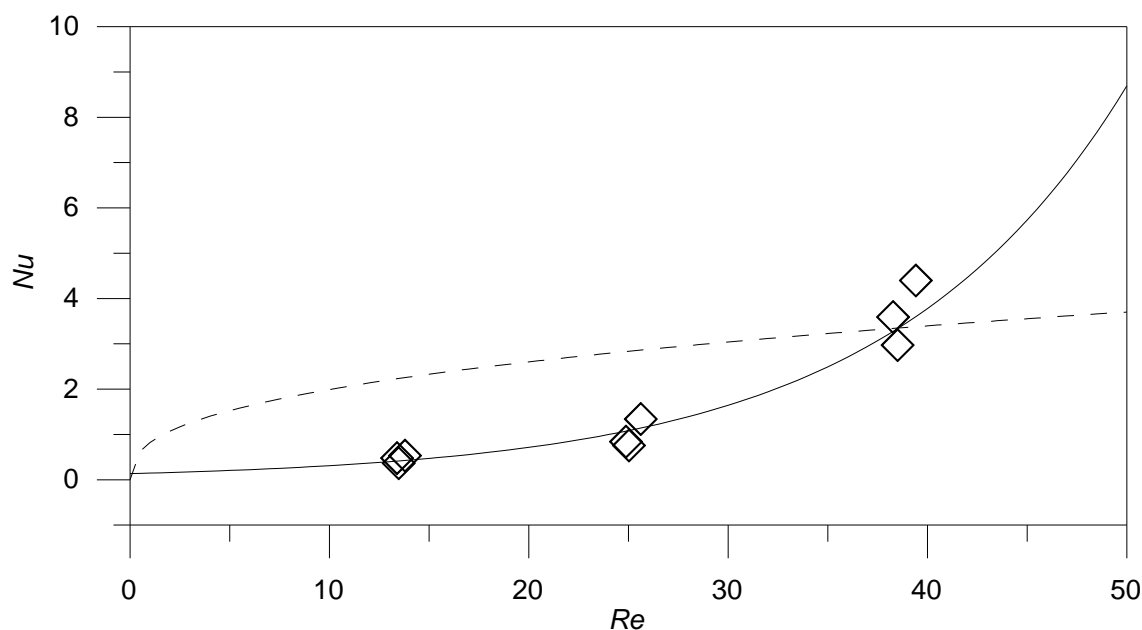


FIGURA 4.50. Comparação entre  $Nu$  estimado com a Equação (4.3) (linha sólida) (proposta nesta investigação) e a Equação (3.12) (linha tracejada) da literatura (BENNETT e MYERS, 1978). Símbolos: valores de  $Nu$  estimados com  $h$  ajustados a partir da cinética experimental de aquecimento dos ramos.

As curvas experimentais e calculadas de secagem dos ramos de erva-mate nas diferentes condições de operação da Tabela 3.4 são apresentadas nas Figuras 4.51 a 4.59. Como era esperado, a umidade média dos ramos decai com o tempo de secagem, porém é particularmente interessante observar que a queda não é do tipo exponencial, o que seria esperado assumindo-se uma temperatura constante do ramos ao longo do tempo, dada pela temperatura média da fase gás. Ao invés disto, observa-se que as curvas assemelham-se a um S invertido e alongado, onde a taxa de secagem é inicialmente baixa, passa por um período intermediário onde é incrementada e volta a diminuir.

O comportamento em S invertido é essencialmente atribuído ao transporte de calor para os ramos. Embora o calor transferido para a superfície seja rapidamente transferido para o interior do sólido, a resistência convectiva é responsável por retardar o equilíbrio térmico. Neste intervalo em que a temperatura do sólido é aumentada, da temperatura ambiente para

aproximadamente a temperatura média da fase gás, a taxa de secagem é naturalmente variável. Em resumo, no período inicial de secagem a temperatura do sólido é baixa e a difusividade da água no sólido é tal que a umidade decai apenas ligeiramente, porém a medida que o sólido é aquecido a inclinação da curva cinética de umidade média dos ramos torna-se mais acentuada. A partir de aproximadamente 3000 s, observa-se que a temperatura do sólido atinge aproximadamente a temperatura média da fase gás, o que torna  $D_a$  independente do aquecimento do sólido governado pela convecção. Nesta fase final, o transporte de massa passa a ser exclusivamente controlado pela 2ª Lei de Fick, e a inclinação da curva de  $M_{pm}$  versus  $t$  é aproximadamente constante.

Novamente, cabe aqui ressaltar que embora uma equação para cálculo da difusividade da água nos ramos (Equação 3.26) (SCHMALKO e ALZAMORA, 2005; SCHMALKO, PERALTA e ALZAMORA, 2007) tenha sido utilizada para estimativa do número de Fourier (Equação 3.25), os perfis de umidade média nos ramos reportados nas Figuras 4.51 a 4.59 foram estimados com  $D_a$  determinados pela Equação (4.4). Uma rápida comparação entre estas equações para cálculo de  $D_a$  nos ramos (Equação 3.26 e Equação 4.4) evidencia que em ambos os casos a difusividade é dependente da temperatura no sólido. Devido a este fato, as curvas de umidade média dos ramos foram geradas por solução de um sistema de equações algébricas não lineares que envolve as Equações (3.9) (de energia) e (3.19) (de massa).

Para construção da Equação (4.4) foram inicialmente obtidos pares ordenados de parâmetros de um modelo do tipo Arrhenius ( $k_o$  e  $E_a$ ) nas três diferentes temperaturas médias do ar e diâmetros dos ramos investigados. O modelo em questão visava correlacionar  $D_a$  com  $T_p$ . O ajuste de  $k_o$  e  $E_a$  foi feito por minimização do somatório do quadrado dos resíduos utilizando o método Simplex de otimização. Visto que  $E_a$  era aproximadamente constante, um valor médio foi empregado, enquanto que a dependência de  $k_o$  com  $D$  e  $T_{gm}$  é dada pelo primeiro termo entre parênteses na Equação (4.4). Esta função foi encontrada assumindo-se inicialmente que  $k_o$  variava linearmente com  $D$  nas diferentes temperaturas, e na sequência correlacionando os coeficientes da reta de  $k_o(D)$  com a temperatura média através de um modelo linear.

$$D_a = \left( -3230 + 1,112 \times 10^6 D + 35,9 T_{gm} - 1,096 \times 10^4 D T_{gm} \right) \exp \left( \frac{-10955}{T_p + 273,15} \right) \quad (4.4)$$

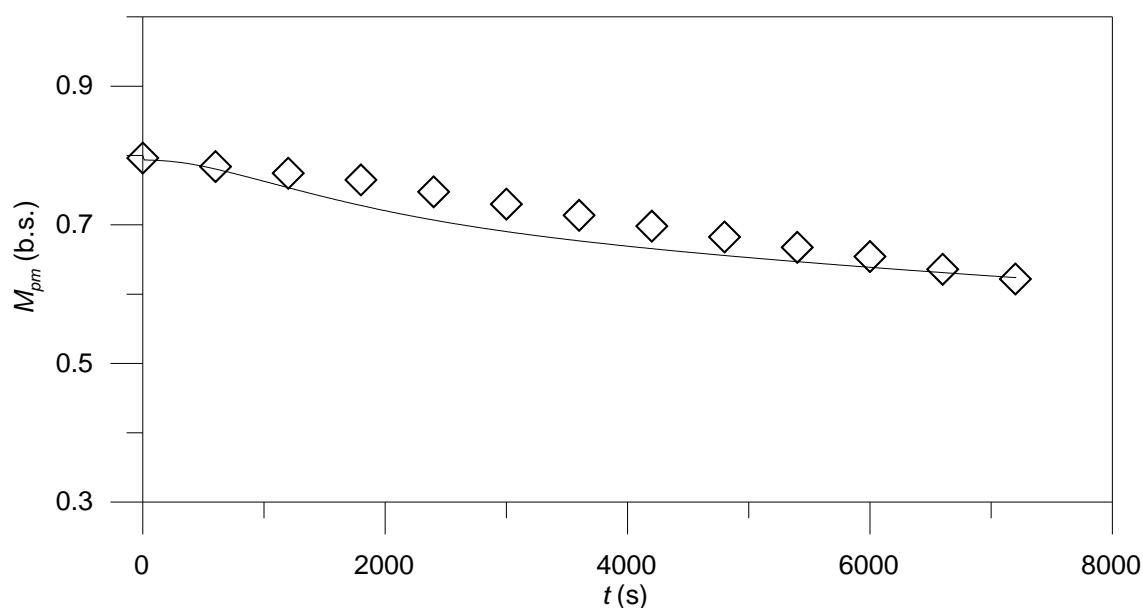


Figura 4.51. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a  $3,5 \times 10^{-3}$  m a  $T_{gm}=65,5$  °C. Condições de operação: ensaio 1 da Tabela 3.4.

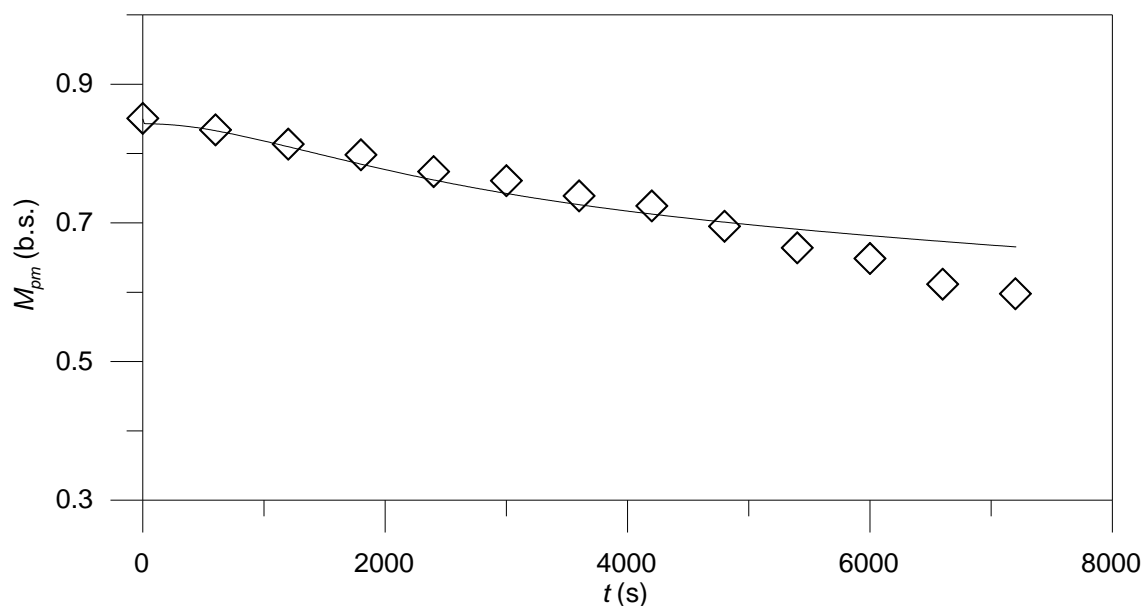


Figura 4.52. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a  $6,5 \times 10^{-3}$  m a  $T_{gm}=65,5$  °C. Condições de operação: ensaio 2 da Tabela 3.4.

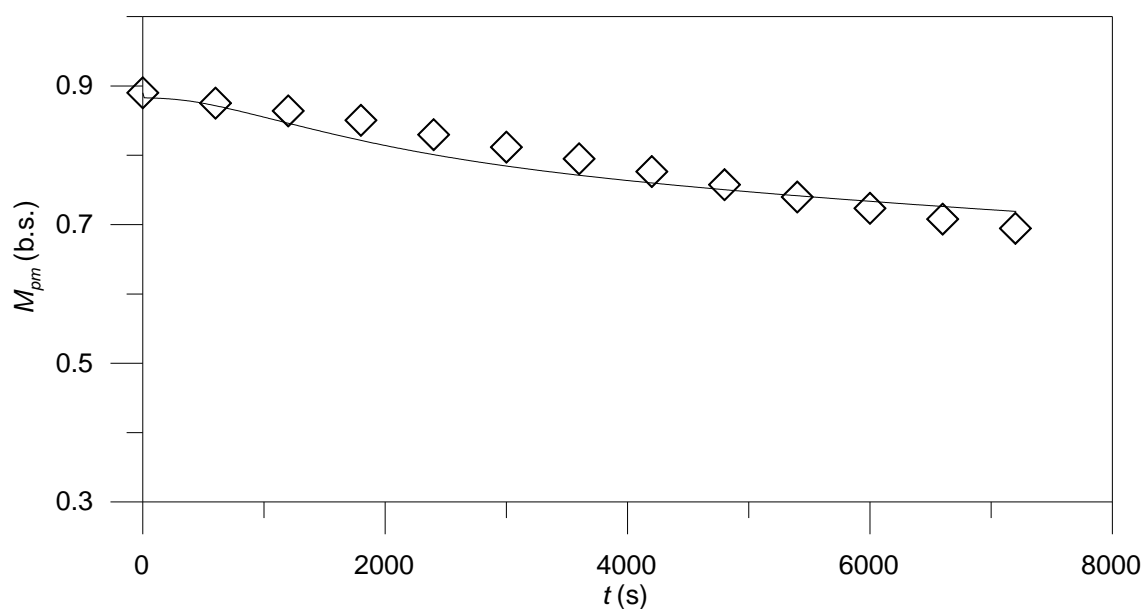


Figura 4.53. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a  $10 \times 10^{-3}$  m a  $T_{gm}=65,5$  °C. Condições de operação: ensaio 3 da Tabela 3.4.

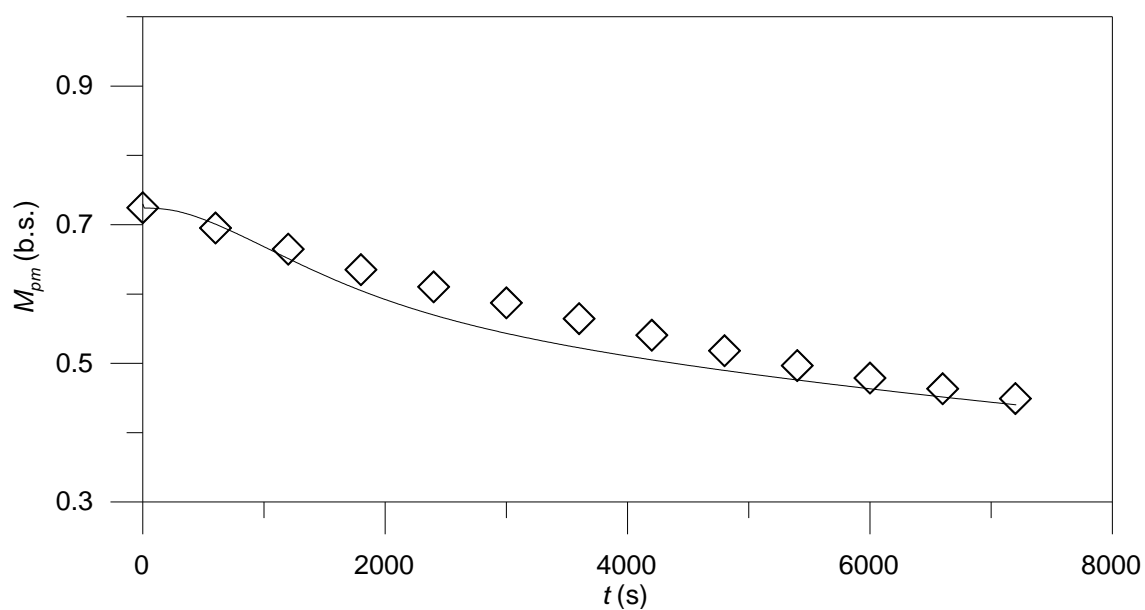


Figura 4.54. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a  $3,5 \times 10^{-3}$  m a  $T_{gm}=80,2$  °C. Condições de operação: ensaio 4 da Tabela 3.4.

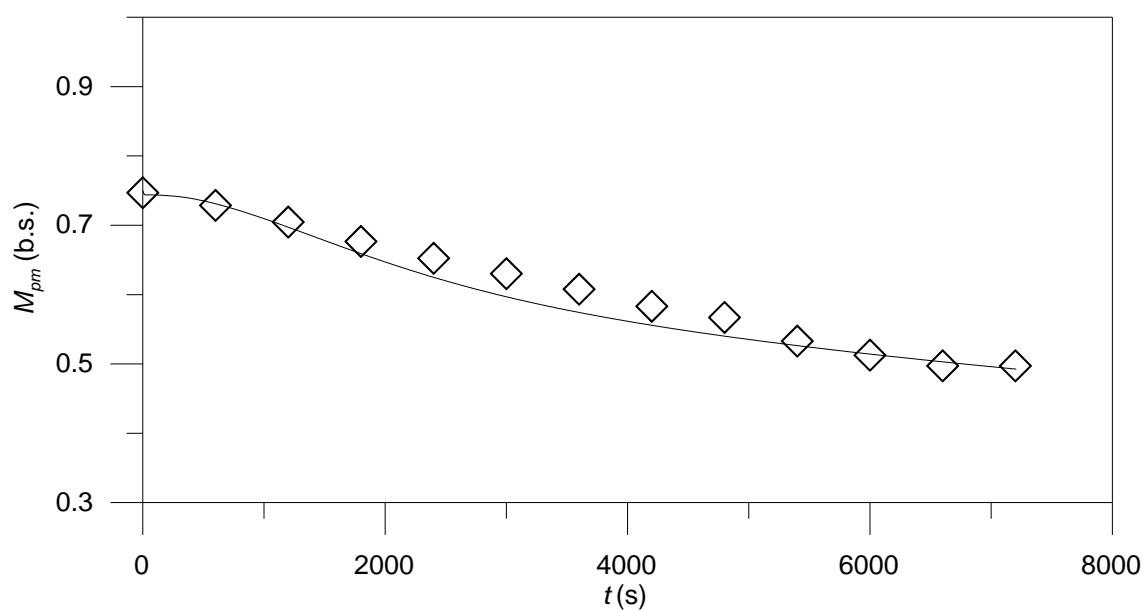


Figura 4.55. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a  $6,5 \times 10^{-3}$  m a  $T_{gm}=80,2$  °C. Condições de operação: ensaio 5 da Tabela 3.4.

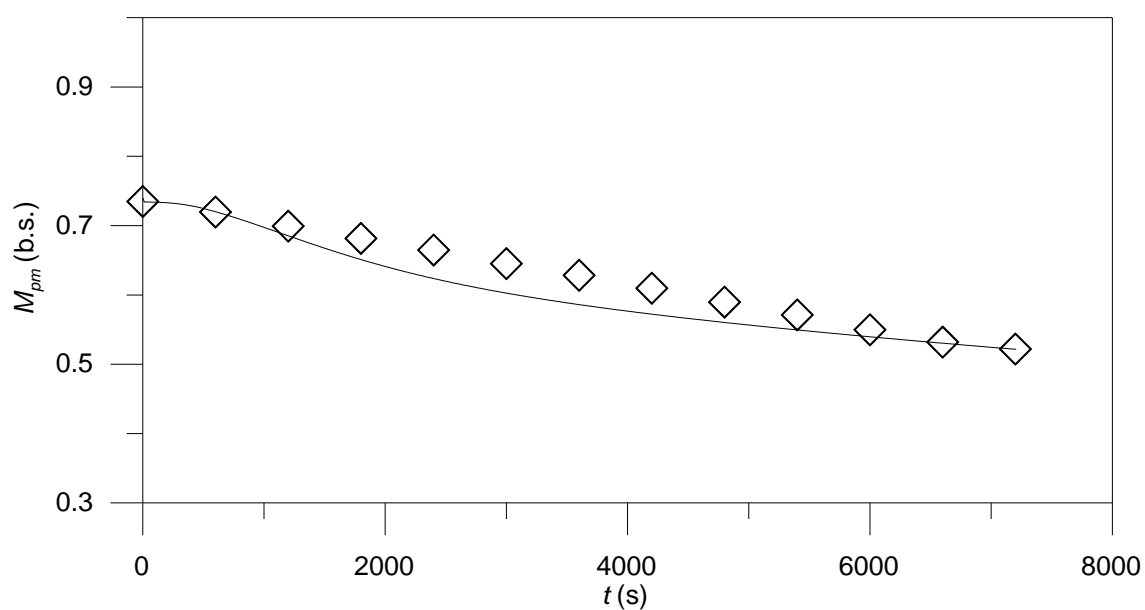


Figura 4.56. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a  $10 \times 10^{-3}$  m a  $T_{gm}=80,2$  °C. Condições de operação: ensaio 6 da Tabela 3.4.



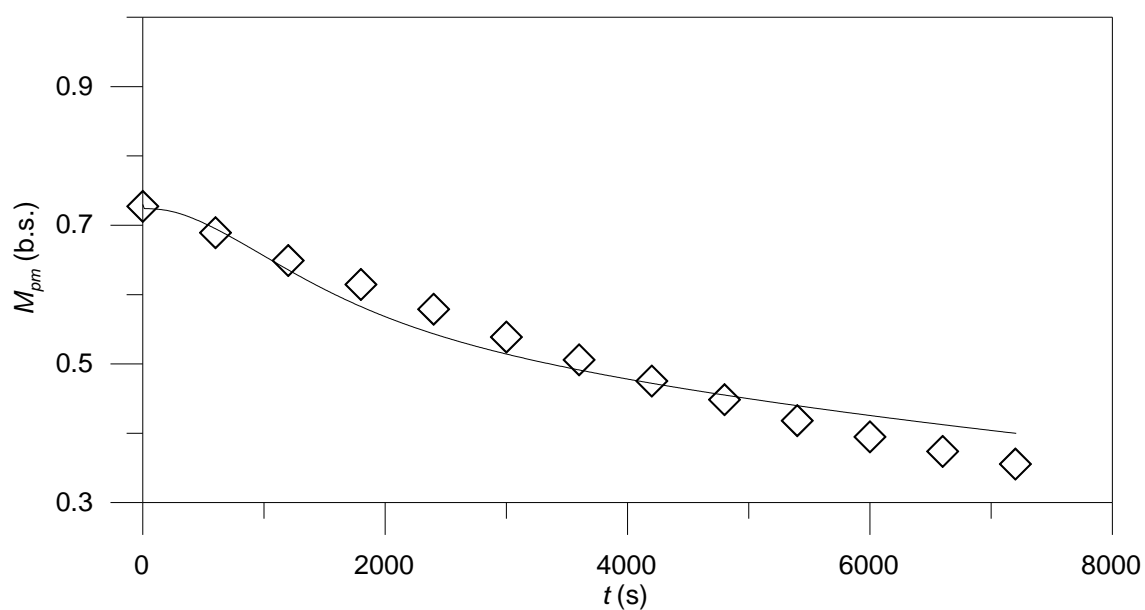


Figura 4.57. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a  $3,5 \times 10^{-3}$  m a  $T_{gm}=83,8$  °C. Condições de operação: ensaio 7 da Tabela 3.4.

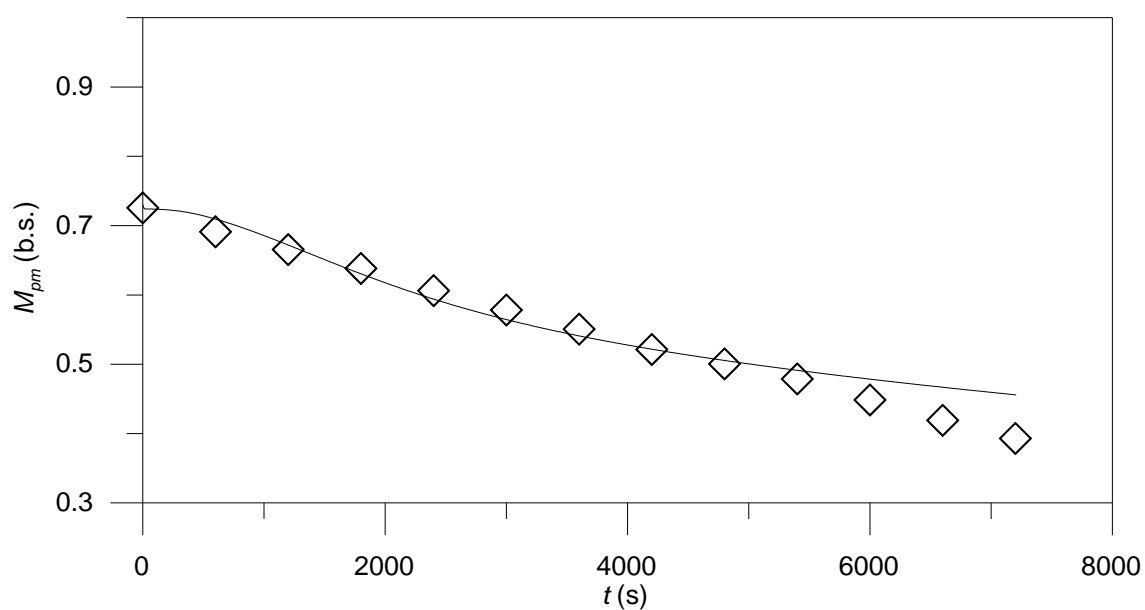


Figura 4.58. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a  $6,5 \times 10^{-3}$  m a  $T_{gm}=83,8$  °C. Condições de operação: ensaio 8 da Tabela 3.4.

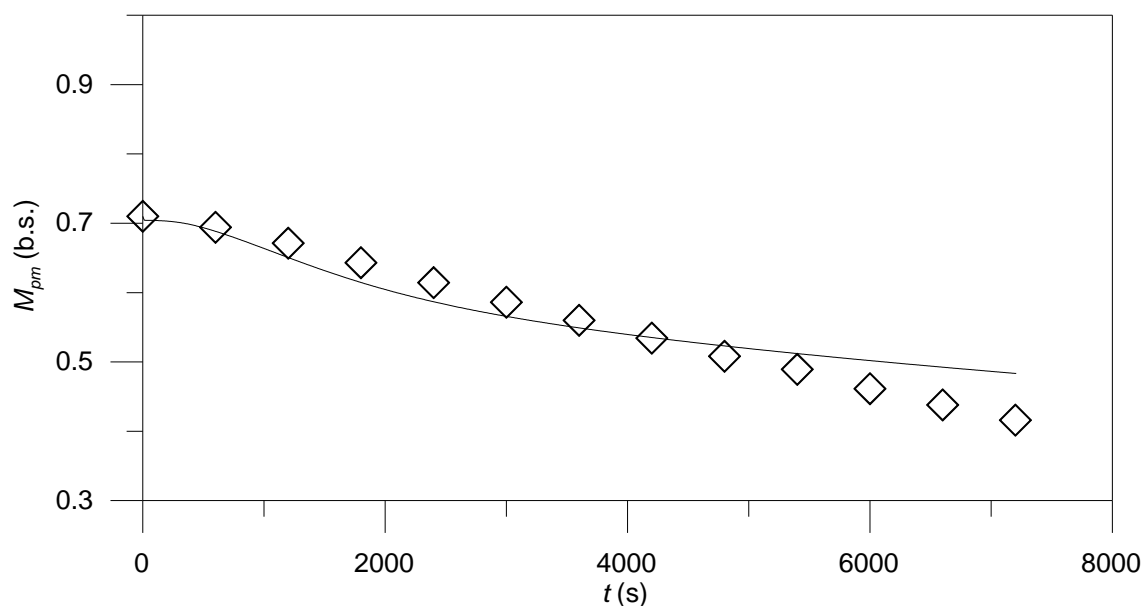


Figura 4.59. Curva experimental (símbolos) e calculada (linha) de secagem de ramos de diâmetro igual a  $10 \times 10^{-3}$  m a  $T_{gm}=83,8$  °C. Condições de operação: ensaio 9 da Tabela 3.4.

Uma comparação entre os resultados experimentais e estimados de umidade evidencia que o modelo reproduz corretamente o transporte de calor e massa nos ramos. Este fato corrobora a hipótese de que o transporte de calor fluido-partícula é governado pela convecção, enquanto que a transferência de massa do soluto para a fase gás é controlada pela difusão e pela taxa de aquecimento do sólido.

#### 4.3. Análise Térmica da Secagem de Folhas e Ramos

Um último aspecto a ser investigado nesta tese foi a eficiência térmica do processo quando a secagem de folhas e ramos é conduzida separadamente e em conjunto. A eficiência térmica é definida como a razão entre a energia efetivamente utilizada e a fornecida ao secador (ZANOELO, DI CELSO e KASKANTZIS, 2007). Assume-se que a energia total fornecida é a energia requerida para aquecer o ar, da temperatura ambiente até a temperatura de secagem, por todo o tempo de secagem, enquanto que a energia empregada

com o propósito de desidratação do sólido é o calor latente de vaporização multiplicado pela massa de água removida do leito durante a operação. Em termos matemáticos a eficiência térmica é definida como reportado na Equação (4.5).

$$\eta = 100 \left\{ \frac{m(Y_{in} - Y)\Delta H_v}{[G(\pi d^2 / 4)t]C_{pg}(T_g - T_\infty)} \right\} \quad (4.5)$$

onde,  $m$  é a massa total de erva-mate seca processada em um secador batelada,  $Y_{in}$  e  $Y$  são respectivamente as umidade inicial e final do sólido,  $\Delta H_v$  é o calor latente de vaporização da água,  $G$  é a velocidade mássica do ar (dada pelo produto da velocidade pela densidade do ar),  $d$  é o diâmetro do leito de secagem,  $C_{pg}$  é o calor específico do ar,  $T_g$  é a temperatura do ar de secagem e  $T_\infty$  é a temperatura ambiente.

A fim de simplificar a análise assume-se que a umidade final após um tempo  $t$  de processamento é dada pela equação de Lewis com umidade de equilíbrio igual a zero. Desta forma, o tempo para que uma determinada umidade  $Y$  seja obtida é definido pela Equação (4.6)

$$t = \frac{\ln(Y_{in}/Y)}{C_s} \quad (4.6)$$

A Tabela 4.1 reporta a condição de operação adotada para cálculo da eficiência térmica. É preciso salientar que as eficiência térmicas foram estimadas considerando apenas 1 kg de erva-seca porque para que os resultados de eficiência sejam válidos é necessário garantir secagem em leito de camada fina, o que é plausível que ocorra se 1 kg de material for distribuído em um leito com 1 m de diâmetro. Neste sentido, é possível que na condição de operação reportada na Tabela 4.1 uma eficiência maior possa ser obtida na prática, pois uma maior quantidade de material poderia ser processada e ainda garantir as taxas de secagem observadas em leitos de camada delgada.

TABELA 4.1. Eficiência térmica de secagem individual de folhas e ramos ( $D=10 \times 10^{-3}$  m) de erva-mate em secador de camada fina

Variável	100 % folhas	100 % ramos
$m$ (kg)	1	1
$Y_{in}$ (kg kg <sup>-1</sup> )	1,5	1,5
$Y$ (kg kg <sup>-1</sup> )	0,1	0,1
$T_g$ (°C)	83,8	83,8
$u_g$ (m s <sup>-1</sup> ) (Equação 3.1)	0,0825	0,0825
$C_s$ (s <sup>-1</sup> ) (Equação 3.5)	$7,42 \times 10^{-4}$	$*6,63 \times 10^{-5}$
$t$ (s) (Equação 4.6)	3650	40845
$\Delta H_v$ (J kg <sup>-1</sup> ) ( $1,013 \times 10^5$ Pa)	$2,26 \times 10^6$	$2,26 \times 10^6$
$\rho_g$ (kg m <sup>-3</sup> ) (Equação 2.6)	0,98	0,98
$Cp_g$ (J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> ) (Equação 2.6)	1009,2	1009,2
$d$ (m)	1	1
$T_\infty$ (°C)	25	25
$\eta$ (%)	23	2,1

\* $C_s$  ajustado pela equação de Lewis para reproduzir dados de variação de umidade de ramos com  $D=10 \times 10^{-3}$  m a  $T_{gm}=83,8$  °C (Figura 4.59).

No caso de ramos e folhas serem processados em conjunto, o rendimento térmico será sempre igual ao rendimento obtido se a mesma batelada contendo somente ramos fosse processada. Isto ocorre porque é preciso garantir a umidade final dos ramos contidos na mistura, o que demandará na condição de operação especificada na Tabela 4.1 um total de aproximadamente 11 horas de secagem.

Entretanto, se uma mistura de 1 kg de ramos e folhas for processada separadamente o rendimento aumentará a medida que aumenta a fração de folhas na mistura, como mostrado na Figura 4.60. Este resultado é possível na prática se folhas e ramos forem dispostos em bandejas separadas e sobrepostas, pois ainda que o tempo necessário para secar qualquer massa de ramos seja o mesmo, e portanto a energia requerida não se altera (denominador da Equação 4.5), a massa de folhas processada aumenta, pois

várias bateladas de folhas podem ser desidratadas neste longo tempo. Em termos matemáticos, esta situação é traduzida pela Equação (4.7).

$$\eta = 100 \left\{ \frac{[ (1/3650) x_f t + (1 - x_f) ] (Y_{in} - Y) \Delta H_v}{[ G ( \pi d^2 / 4 ) t ] C_{pg} (T_g - T_\infty)} \right\} \quad (4.7)$$

O primeiro termo da soma entre colchetes no numerador da Equação (4.7) denota o quanto de folhas pode ser processado em  $t=40845$  s (tempo de processamento de qualquer quantidade de ramos com  $D=10 \times 10^{-3}$  m a  $T_{gm}=83,8$  °C em leito de camada fina).

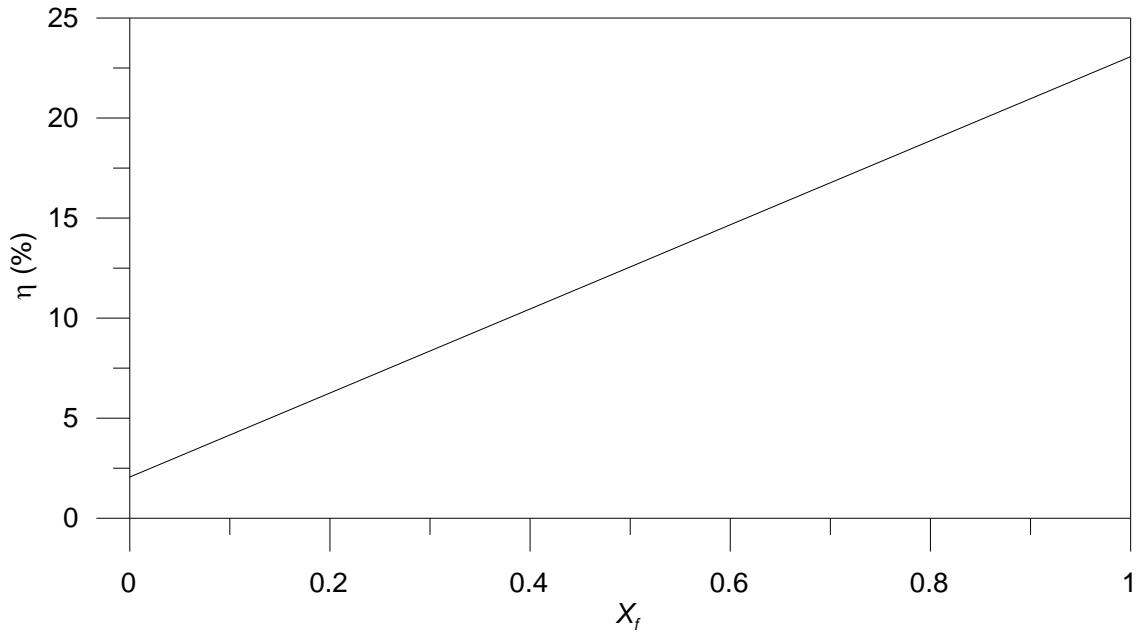


Figura 4.60. Variação de eficiência térmica em função da fração mássica de folhas ( $x_f$ ) processada em um leito batelada com folhas e ramos em bandejas separadas.

A situação fictícia de secagem esboçada pode ser implementada em escala industrial sem grandes dificuldades se secadores contínuos com esteiras sobrepostas que contenham somente folhas e ramos forem empregados. Obviamente a velocidade da esteira contendo folhas seria muito

maior, o que aumentaria a quantidade de água removida e, por consequência a eficiência do secador.

## 5. CONCLUSÕES

Um modelo fenomenológico, porém não mecanístico, para secagem de folhas de erva-mate em um leito de camada delgada, em um secador contínuo de esteira, foi validado dentro do intervalo de condições de operação tipicamente encontrado em plantas industriais de manufatura de mate. Com base neste modelo, a umidade das folhas na descarga de um secador de bancada, não isotérmico, de passagem simples e zona única foi controlada com sucesso por ajuste manual da velocidade da esteira entre  $3,7 \times 10^{-4}$  e  $15,2 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  por aproximadamente 7200 s em intervalos de 120 s. Apesar da variação considerável da umidade na alimentação do secador ( $\approx 0,5\text{--}1,7$  em base seca) e temperatura média de secagem ( $\approx 70\text{--}97^\circ\text{C}$ ), a consistência do esquema para manter a umidade sob controle foi confirmada. O bom controle em uma condição fluidodinâmica não ideal (isto é, na presença de gradientes axiais de velocidade do ar e temperatura) é um elemento adicional que ressalta a robustez do sistema de controle proposto.

Os resultados experimentais e teóricos para secagem e aquecimento de ramos de erva-mate indicam que a transferência de calor e massa envolvida nesta operação é governada pela convecção e difusão, respectivamente. Baseado nestas evidências, foram propostos modelos fundamentais, porém envolvendo coeficientes de transporte ajustados, os quais reproduziram de forma correta as curvas experimentais de secagem e aquecimento de ramos em condições (diâmetro dos ramos:  $3,5 \times 10^{-3}\text{--}10 \times 10^{-3} \text{ m}$ ; temperaturas médias do ar:  $65,5\text{--}83,8^\circ\text{C}$ ) que se aproximam daquelas efetivamente encontradas na operação industrial de secagem de erva-mate. O modelo sugerido pode ser utilizado para projeto, otimização e controle de um estágio de secagem exclusivamente de ramos em um secador de esteira de camada fina. Neste ponto, cabe novamente destacar que o processamento de folhas e ramos em esteiras individuais e sobrepostas favorece a eficiência térmica, o controle da operação de secagem e a qualidade do produto final, pois reduz os gradientes de umidade na descarga associados as diferentes características do material

processado (folhas e ramos) em termos de forma, dimensões e estrutura interna.



## REFERÊNCIAS

ABIR, Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes (2008). Dados de mercado 2008. Evolução de bebidas não alcóolicas por categorias 2004 a 2008. <http://abir.org.br/2011/01/12/dados-de-mercado-2008/>. Último acesso em 20/09/2012

ABIR, Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes (2011). Dados de mercado 2011. Consumo de todas as bebidas comerciais 2005 - 2010. <http://abir.org.br/2011/10/24/dados-de-mercado-2011/>. Último acesso em 20/09/2012

ABITANTE, A. L. Modelagem dinâmica e análise de um sistema de controle de umidade de folhas de erva-mate em secadores contínuos de esteira. Dissertação. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 2007.

AMAZOUZ, M.; PANTEA, R. Use of multivariate data analysis for lumber drying process monitoring and fault detection. In Proceedings of the International Conference on Data Mining, Las Vegas, USA, June 26-29, p. 329-332, 2006.

ANDRADE, F. M. Diagnóstico da Cadeia Produtiva da *Ilex paraguariensis* St. Hill., Erva-Mate. São Mateus do Sul: Fundo Brasileiro para a Biodiversidade/FUNBIO, 1999.

ARPACI, V. S. Conduction Heat Transfer. Reading: Addison-Wesley, 1966.

BARBOSA, F. F.; MELO, E. C.; SANTOS, R. H. S.; ROCHA, R. P.; MARTINAZZO, A. P.; RADUNZ, L. L.; GRACIA, L. M. N. Evaluation of mathematical models for prediction of thin layer drying of brazilian lemonscented verbena leaves (*Lippia alba* (mill) N.E. Brown). Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 9, n. 1, p. 73-82, 2007. BASTOS, D.H.M.; FORNARI, A.C.; QUEIROZ, Y.S.; TORRES, E.A.F.S. Bioactive Compounds

Content Of Chimarrão Infusions Related To The Moisture Of Yerba Maté (*Ilex Paraguariensis*) Leaves. *Arquivos de Biologia e Tecnologia*, v. 49, n. 3, p. 399-404, 2006.

BENINCÁ, C. Estabilidade do ácido 5-o-cafeoilquínico: relação entre a cinética química e o processamento de erva-mate. Dissertação. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 2009.

BENNETT, C. O.; MYERS, J. E. Fenômenos de Transporte. Quantidade de Movimento, Calor e Massa. São Paulo: McGraw-Hill, 1978.

BERTÉ, K. A. S. Tecnologia da erva-mate solúvel. Tese. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 2011.

BRASIELLO, A.; GIUSEPPINA, A.; RUSSO, P.; CRESCITELLI, S.; ALBANESE, D.; DI MATTEO, M.. Mathematical modeling of eggplant drying: Shrinkage effect. *Journal of Food Engineering*, v. 114, p. 99-105, 2013.

BUSCHMULLER, C.; WIEDEY, W.; DÖSCHER, C.; DRESSLER, J.; BREITKREUTZ, J. In-line monitoring of granule moisture in fluidized-bed dryers using microwave resonance technology. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, v. 69, n. 1, p. 380-387, 2008.

CALÇADA, L. A., BISCAIA, Jr. E., MASSARANI, G. Modelagem e simulação de secadores em leito fixo. *Proceedings of the XXI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos*, p. 384–395, Ouro Preto, MG, Brazil (in Portuguese), 1993.

CARDOZO-JÚNIOR, E. L.; FERRARESE-FILHO, O.; CARDOZO-FILHO, L.; FERRARESE, M. L. L.; DONADUZZI, C. M.; STURION, J. A. methylxanthines and phenolic compounds in mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) Progenies Grown in Brazil. *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 20, n. 7, p. 553–558, 2007.

CHEFTEL, J. C., CHEFTEL, H. Introduccion a la Bioquimica y Tecnologia de Los Alimentos. Acribia, Zaragoza, Spain, 1992.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Cultivo de ervamate. Embrapa Florestas – Sistema de Produção, 2005. Disponível em <[http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Ervamate/CultivodaErvamate/18\\_5\\_preparacao\\_do\\_cha\\_mate\\_tostado.htm](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Ervamate/CultivodaErvamate/18_5_preparacao_do_cha_mate_tostado.htm)>. Acessado 17/06/2013.

ESMELINDRO M.C., TONIAZZO G., WACZUK A., DARIVA C., OLIVEIRA D. Caracterização Físico-Química da Erva-Mate: Influência das Etapas do Processamento Industrial, Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 22, n. 2, p. 193-204, 2002.

FELLOWS, P. J. Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática. 2 edição. Porto Alegre: Artmed, p. 602, 2006.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. Princípios das operações unitárias. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982.

GAWANDE, N. A.; REINHART, D. R.; THOMAS, P. A.; MCCREANOR, P. T.; TOWNSEND, T. G. Municipal solid waste in situ moisture content measurement using an electrical resistance sensor. Waste Management, v. 23, n. 7, p. 667-674, 2003.

GILMOUR, I. A. Tea. Wood & Woody Biomass Use in the Agro Industries. Technical Report No. 1987/2, Department of Minerals and Energy, Papua New Guinea, 1987.

HALL, M. N.; ROBERTSON, A.; SCOTTER, C. N. G. Near-infrared reflectance prediction of quality, theaflavin content and moisture content of black tea. Food Chemistry, v. 27, p. 61-75, 1988.

HALLOY, S. R. P.; REID, J. B. Growing yerba mate. In: Use of climate, soil and crop information for identifying potential land use change in the Hokianga and Western Kaipara Region (Wratt D ed), chap. 11, 88-97, Naiwa, Wellington, New Zealand, 2003.

HEMIS, M.; BETTA HAR, A.; SINGH, C. B.; BRUNEAU, D.; JAYAS, D. S. An experimental study of wheat drying in thin layer and mathematical simulation of a fixed-bed convective dryer. *Drying Technology*, v. 27, p. 1142-1151, 2009.

HIL, C. L.; LAW, C. L.; CLOKE, M. Modelling of thin layer drying kinetics of cocoa beans during artificial and natural drying. *Journal of Engineering Science and Technology*, v. 3, n. 1, p. 1-10, 2008.

HOLOWATY, S. A.; RAMALLO, L. A.; SCHMALKO, M. E. Intermittent drying simulation in a deep bed dryer of yerba maté. *Journal of Food Engineering*, v. 111, p. 110-114, 2012.

HOLMAN, J. P. Transferência de calor. São Paulo: McGraw-Hill, 1983.

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. Tea - determination of loss in mass at 103 °C. Geneva: ISO Standard 1573, 1980.

JENSEN, S. Modelagem e investigação experimental dos processos de secagem e extração de erva-mate (*Ilex paraguariensis*). Tese. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 2011.

JENSEN, S.; MELEIRO, L. A. C.; ZANOELO, E. F. Soft-sensor model design for control of a virtual conveyor-belt dryer of mate leaves (*Ilex paraguariensis*). *Biosystems Engineering*, v. 108, p. 75-85, 2011.

KARIM, Md A.; HAWLADER, M. N. A.. Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 48, p. 4914-4925, 2005.

KING, M. B.; MUBARAK, A.; KIM, J. D.; BOTT, T. R. The mutual solubilities of water with supercritical and liquid carbon dioxides. *The Journal of Supercritical Fluids*, v. 5, n. 4, p. 296-302, 1992.

KIRANOUDIS, C. T.; MAROULIS, Z. B.; MARINOSKOURIS, D. Dynamic simulation and control of conveyor-belt dryers. *Drying Technology*, v. 12, p. 1575-1603, 1994.

KIRANOUDIS, C. T., BAFAS, G. V., MAROULIS, Z. B., MARINOS-Kouris, D. MIMO control of conveyor-belt drying chambers. *Drying Technology*, v. 13, p. 73-97, 1995.

KOOP, L. Modelo de duas fases, transiente e bi-dimensional para simulação da secagem de erva-mate (*ilex paraguariensis*) em secador contínuo de camada espessa. Dissertação. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 2014.

LIU, P.; TAN, S. X. D.; YAN, B.; MCGAUGHY, B. An efficient terminal and model order reduction algorithm. *Integration, the VLSI journal*, v. 41, p. 210-218, 2008.

MACCARI JUNIOR, A. Análise do pré-processamento da erva-mate para chimarrão. Tese. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola, 2005.

MANDAS, N., HABTE, M. Numerical simulation static-bed drying of barley. *Biosystems Engineering*, v. 82, p. 313-319, 2002.

MANTANUS, J.; ZIÉMONS, E.; LEBRUN, P.; ROZET, E.; KLINKENBERG, R.; STREEL, B.; EVRAD, B.; HUBERT, Ph. Moisture content determination of pharmaceutical pellets by near infrared spectroscopy: method development and validation. *Analytica Chimica Acta*, v. 642, p. 186-192, 2009.

MARTINELLO, M. A.; MUÑOZ, D. J.; GINER, S. A. Mathematical modelling of low temperature drying of maize: comparison of numerical methods for solving the differential equations. *Biosystems Engineering*, v. 114, p. 187-194, 2013.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. Unit operations of chemical engineering. Fourth edition, McGraw-Hill, Singapore, 1985.

MIZUKAMI, Y.; SAWAI, Y.; YAMAGUCHI, Y. Moisture content measurements of tea leaves by electrical impedance and capacitance. *Biosystems Engineering*, v. 93, p. 293-299, 2006.

MUJUMDAR, A. S. Handbook of Industrial Drying. Taylor and Francis, New York, USA, 2006.

NUÑEZ, J. C.; KÄNZIG, R.G. Secanza de yerba mate. In: Winge, H.; Ferreira, A. G.; Mariath, J. E. A.; Tarasconi, L. C. Erva-mate: biologia e cultura no Cone Sul. PortoAlegre: UFRGS, p. 175-180, 1995.

ORTEGA, M. G.; CASTAÑO, F.; VARGAS, M.; RUBIO, F. R. Multivariable robust control for a rotary dryer: Analysis and design. *Control Engineering Practice*, v. 15, p. 487-500, 2007.

PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modelling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, v. 52, p. 349-357, 2002.

PARANÁ – SEAB – Secretaria da Agricultura e do Abastecimento do Paraná. Diagnóstico e Alternativas para a Erva-mate *Ilex paraguariensis*, por Mazuchowski, J., Z. e Rücker, N. A. Curitiba, p. 141, 1993.

RAGHAVAN, G. S. V.; LI, Z.; WANG, N.; GARIÉPY, Y. Control of microwave drying process through aroma monitoring. *Drying Technology*, v. 28, p. 591-599, 2010.

RANTANEM, J.; LEHTOLA, S., RÄMET, P.; MANNERMAA, J. P.; YLIRUUSI, J. On-line monitoring of moisture content in an instrumented fluidized bed granulator with a multi-channel NIR moisture sensor. *Powder Technology*, v. 99, p. 163-170, 1998.

RYWOTYCKI, R. Electric sensor for prompt measurement of moisture content in solid food products. *Journal of Food Process Engineering*, v. 25, p. 473-483, 2003.

RODRIGUESA, F. T. CARDOZO-FILHO, L.; ZANOELO, E. F.; Boiling point of aqueous solutions of mate (*Ilex paraguariensis*). Modeling and simulation of a batch evaporator. *Biosystems Engineering*, v. 107, p. 242-250, 2010.

ROTTA, E.; OLIVEIRA, Y. M. M.; Cultivo da erva-mate. Colombo: Embrapa florestas, (Sistemas de produção n.1), 2005.

SCHMALKO, M. E.; ALZAMORA, S. M. Modelling the drying of a twig of "yerba mate" considering as a composite material. Part II: mathematical model. *Journal of Food Engineering*, v. 67, p. 267-272, 2005.

SCHMALKO, M. E.; MACIEL, S.; DELFEDERICO, L. E. Estudio de la Eficiencia Energética de un Secadero de Yerba Mate. In: 3° Congresso Sul-Americano da Erva-Mate. Chapecó, 2003.

SCHMALKO M. E.; MORAWICKI R. O.; RAMALLO, L. A. Simultaneous Determination of Specific Heat Capacity and Thermal Conductivity Using the Finite-difference Method. *Journal of Food Engineering*, v. 31, p. 531-540, 1997.

SCHMALKO, M. E.; LOVERA, N. N.; KOLOMIEJEC, G. C. Moisture migration during a tempering time after the heat treatment step in yerba maté processing. *Latin American Applied Research*, v. 41, p. 153-156, 2011.

SCHMALKO, M. E.; PERALTA, J. M.; ALZAMORA, S. M. Modeling the drying of a deep-bed of *Ilex paraguariensis* in an industrial belt conveyor dryer. *Drying Technology*, v. 25, p. 1967-1975, 2007.

SCHMALKO, M. E.; SCIPIONI, P. G.; FERREYRA, D. J. Effect of Water Activity and Temperature in Color and Chlorophylls Changes in Yerba Mate Leaves. *International Journal of Food Properties*, v. 8, n. 2, p. 313-322, 2005.

SHARP, J. R. A review of low temperature drying simulation 1 models. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 27, p. 169–190, 1982.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; GAMA, F. J. A.; GOMES, J. P.. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, v. 13, p. 67-74, 2014.

SISSOM, L. E.; PITTS, D. R. *Fenômenos de Transporte*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1979.

SRIVASTAVA, V. K., JOHN, J. Deep bed grain drying modeling. *Energy Conversion and Management*, v. 43, p. 1689-1708, 2002.

STAWCZYK, J.; MUÑOZ, I.; COLLELL, C.; COMAPOSADA, J. Control system for sausage drying based on on-line NIW aw determination. *Drying Technology*, v, 27, p. 1338-1343, 2009.

St. GEORGE, S. D.; CENKOWSKI, S. Modeling of thin-layer drying on an inert sphere. *Drying Technology*, v. 27, p. 770-781, 2009.

TAHERI-GARAVANDA, A.; RAFIEEA, S.; KEYHANIA, A. Mathematical modelling of thin layer drying kinetics of tomato. Influence of air dryer conditions. *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*. v. 2, n. 2, p. 147-160, 2011.



TEMPLE, S. J.; VAN BOXTEL, A. J. B. A comparison of dryers types used for tea drying. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 77,n. 4, p. 401-407, 2000.

TEMPLE, S. J.; VAN BOXTEL, A. J. B. Fluidization of Tea. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 74, n. 1, p. 5-11, 1999a.

TEMPLE, S. J.; VAN BOXTEL, A. J. B. Thin layer drying of black tea. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 74, p. 167–176, 1999b.

TEMPLE, S. J.; VAN BOXTEL, A. J. B.; VAN STRATEN, G. Control of fluid bed tea dryers: controller performance under varying operating conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 29, p. 217-231, 2000.

TUSSOLINI, L., OLIVEIRA, J. S., FREIRE, F. B., FREIRE, J. T., ZANOELO, E. F. Thin layer drying of mate leaves (*Ilex paraguariensis*) in a conveyor-belt dryer: a semi automatic control strategy based on a dynamic model. *Drying Technology*, 2014, DOI: 10.1080/07373937.2014.900504.

VAN DELFT, T. J. Modeling and model predictive control of a conveyor-belt dryer applied to the drying of fish feed. *Dissertação*. Norwegian University of Science and Technology, Oslo, Norway. 2010.

VILCAHUAMAN, L. J. M. Caracterizacion y evaluacion economica del sistema agroflorestal yerba mate en el sur de Brasil: un enfoque financeiro, de optimización y de riesgo. PhD Thesis, Institucion de Ensenanza e Investigaciomen Ciencias Agrícolas, México, 1999.

WANG, h. G.; SENIOR, P. R.; MANN, R.; YANG, W. Q. Online measurement and control of solids moisture in fluidized bed dryers. *Chemical Engineering Science*, v. 64, p. 2893-2902, 2009.

ZANOELO, E. F.; ABITANTE, A.; MELEIRO, L. A. Dynamic modeling and feedback control for conveyors-belt dryers of mate leaves. *Journal of Food Engineering*, v. 84, p. 458-468, 2008.

ZANOELO, E. F. A theoretical and experimental study of simultaneous heat and mass transport resistances in a shallow fluidized bed dryer of mate leaves. *Chemical Engineering and Processing*, v. 46, p. 1365-1375, 2007.

ZANOELO, E. F.; BENINCÁ, C.; RIBEIRO, E. Thermophysical properties of mate leaves: experimental determination and theoretical effect of moisture content. *Journal of Food Process Engineering*, v. 34, p. 2124-2136, 2011.

ZANOELO, E. F.; CARDOZO-FILHO, L.; CARDOZO-JÚNIOR, E. L. Superheated steam-drying of mate leaves and effect of drying conditions on the phenol content. *Journal of Food Process Engineering*, v. 29, p. 253-268, 2006.

ZANOELO, E. F., CARDOZO FILHO, L., NASCIMENTO FILHO, I., CARDOZO JÚNIOR, E. L. Um Novo Conceito de Processo para a Indústria Ervateira. 3º CONGRESSO SUL AMERICANO DE ERVA-MATE, Chapecó, v. 6, p. 1-6, 2003.

ZANOELO, E. F.; DI CELSO G. M.; KASKANTZIS, G. Drying kinetics of Mate Leaves in a Packed Bed Dryer. *Biosystems Engineering*, v. 96, n. 4, p. 487-494, 2007.

ZANOELO, E. F. Equilibrium Moisture Isotherms for Mate Leaves. *Biosystems Engineering*, v. 92, n. 4, p. 445-452, 2005.

ZARE, D., CHEN, G. Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 68, p. 78-87, 2009.

ZARE, D., JAYAS, D. S., SINGH, C. B. A generalized dimensionless model for deep bed drying of paddy. *Drying Technology*, v. 30, p. 44-51, 2012.

ZHU, A.; SHEN, X.. The model and mass transfer characteristic of convection drying of peach slices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 72, p. 345-351, 2014.